

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

FREDERICO DEIVSON RIBEIRO

Uma estratégia para escalonamento de consumo de energia elétrica em cenários com geração distribuída

Goiânia, 2021.

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

FREDERICO DEIVSON RIBEIRO

Uma estratégia para escalonamento de consumo de energia elétrica em cenários com geração distribuída

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Tecnologia de Processos Sustentáveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Energias Renováveis e Engenharia Econômica Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Raphael de Aquino Gomes

Goiânia, 2021.

R354e Ribeiro, Frederico Deivson.

Uma estratégia para escalonamento de consumo de energia elétrica em cenários com geração distribuída / Frederico Deivson Ribeiro. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.

114 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Raphael de Aquino Gomes.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. Energia elétrica. 3. Biomassa. I. Gomes, Raphael de Aquino (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 621.47

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva Abreu CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor:

Matrícula:

Título do Trabalho:

Autorização - Marque uma das opções

- Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ___/___/___ (Embargo);
- Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2** ou **3**, marque a justificativa:

- O documento está sujeito a registro de patente.
 O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
 Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia-Go, 04 / Nov / 2021.

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

PARECER 8/2021 - GYN-CMTPS/GYN-DPPGE/CP-GOIANIA/IFG

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

Frederico Deivson Ribeiro

**UMA ESTRATÉGIA PARA ESCALONAMENTO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CENÁRIOS COM
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPGTPS - IFG) - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Energias Renováveis e Engenharia Econômica Aplicada.

Presidente e Orientador: Prof. Dr. RAPHAEL DE AQUINO GOMES – PPGTPS IFG

Avaliador: Prof. Dr. SÉRGIO BOTELHO DE OLIVEIRA – PPGTPS IFG

Avaliador Externo: Prof. Dr. MARCELO LISBOA ROCHA – UFT

Avaliador: Prof. Dr. ÉLDER GERALDO DOMINGUES – PPGTPS IFG

Aprovado em: 29/07/2021

Documento assinado eletronicamente por:

- Marcelo Lisboa Rocha, MARCELO LISBOA ROCHA - DOCENTE - IFG - CÂMPUS GOIÂNIA (10870883000225), em 29/09/2021 11:26:45.
- Elder Geraldo Domingues, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 02/08/2021 09:10:18.
- Sergio Botelho de Oliveira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/07/2021 11:31:21.
- Raphael de Aquino Gomes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/07/2021 11:21:26.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 30/07/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 185199

Código de Autenticação: bd83d392a9



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110

(62) 3227-2811 (ramal: 2811)

DEDICATÓRIA

Dedico inteiramente esta dissertação à minha mãe, Maria José Bento que partiu deixando saudades. Fica para a Senhora Mamã esta singela homenagem. Sei que de onde estiver estará orgulhosa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Criador que conduziu-me até aqui em sua infinita sabedoria guiando meus pensamentos para cumprir mais esta jornada nesta vida.

Agradeço minha esposa Vânia e meus filhos Laura e Antônio por compreenderem os momentos difíceis e sempre me apoiarem. Fica para eles meus sinceros agradecimentos e o exemplo de que é preciso continuar sempre em frente independente dos obstáculos.

À minha mãe Maria José que em seus últimos momentos me ensinou que precisamos aceitar as diferenças e não julgar a felicidade dos outros como se fosse a sua. Muitíssimo obrigado por ter vindo até aqui comigo.

De forma muito especial quero agradecer ao meu orientador, professor Raphael de Aquino Gomes, que mesmo passando por problemas sempre conduziu a pesquisa de forma exemplar para que o nosso objetivo fosse alcançado. Colocou-se sempre a frente das pesquisas apontando as direções corretas, abrindo oportunidades e contribuindo de forma relevante em pontos chave em cada etapa do processo. Esteve disponível para auxiliar e conduzir este trabalho de forma categórica motivando e incentivando em todos os momentos.

É importante também agradecer o apoio de todos os professores do programa e em especial os professores, José Luis Domingos, Sérgio Botelho de Oliveira, Elder Geraldo Domingues e Aylton José Alves que contribuíram de forma direta nas pesquisas. Sempre estiveram à disposição quando solicitados para sanar dúvidas que auxiliaram de forma inestimável a conclusão deste trabalho.

Ao professor Marcelo Lisboa da Universidade Federal do Tocantins-UFT por sua participação. Muito obrigado professor por estar presente neste trabalho e como sempre impecável com suas contribuições.

Aos meus colegas de turma que me permitiram conviver em um ambiente com grande colaboração, amigável e participativo. Muito importante ressaltar que foi de grande importância este ambiente e acredito que criei amigos que seguiremos juntos muito além do mestrado.

Em especial quero agradecer ao Sr Wanderlei Carvalho Rosa, proprietário da Brasil Detectores, que foi uma pessoa que sempre acreditou no meu trabalho, me permitiu vislumbrar novos horizontes e me ofertou as ferramentas necessárias para isto. É com grande satisfação que hoje posso citá-lo neste trabalho e afirmar que graças a confiança depositada em mim e as oportunidades que me foram concedidas pude concluir mais esta

etapa da minha vida. Muitíssimo obrigado Sr Wanderlei, que Deus continue cobrindo o senhor, sua família e seus negócios com graças e bençãos.

A minha irmã Cláudia, que é realmente a inteligente da família e sempre esteve a disposição para me auxiliar nas dificuldades que tive ao decorrer desta jornada. Sempre afirmei que estava fazendo um mestrado na frente dela de abusado que sou. Pronto, agora é a sua vez.

Ao Senar-GO, e em especial a Sra Claudimeire de Castro Oliveira, que é a coordenadora técnica Senar/GO da Formação Profissional Rural (FPR) - Departamento técnico (gerência de FPR). O Senar-GO me deu a oportunidade de pertencer ao seu seletto grupo de instrutores e com esta oportunidade estamos levando para o campo toda nossa pesquisa, aplicando e aprimorando na prática todo conhecimento adquirido. A instituição está abrindo as portas para levarmos à diante novos trabalhos e melhorar a vida do produtor rural.

RESUMO

Título: Uma estratégia para escalonamento de consumo de energia elétrica em cenários com geração distribuída

Autor: Frederico Deivson Ribeiro

Orientador: Dr. Raphael de Aquino Gomes

A multiplicidade de fontes de geração de energia, aliada à necessidade de uso de alternativas renováveis, aumenta o investimento em geração distribuída. Isso é particularmente verdadeiro no Brasil devido às suas condições climáticas e econômicas. O país possui um excelente índice de irradiância solar para a produção de energia elétrica fotovoltaica e uma vasta extensão territorial com um modelo econômico voltado para a agricultura e pecuária com uma quantidade significativa de biomassa disponível. Porém, para aproveitar ao máximo deste potencial, é necessário desenvolver soluções otimizadas que permitam definir as melhores estratégias de programação de consumo, dadas as condições de geração de energia elétrica. Diante disso, este trabalho apresenta os resultados de uma estratégia para o melhoramento da programação de consumo de energia elétrica com base no problema de *Bin Packing*. São propostas adaptações nas principais heurísticas existentes para este problema, como forma de fornecer uma solução que possibilite melhorar o aproveitamento do potencial energético em cenários com geração distribuída a partir de sistemas fotovoltaicos e biomassa. Inicialmente, é descrita uma proposta de modelagem do consumo de energia e do potencial de geração de energia a partir de fontes fotovoltaicas e de biomassa. Em seguida, por meio de um estudo de caso, são discutidos os resultados da proposta considerando o total de energia disponível, funcionalidade e as características dos equipamentos eletroeletrônicos. Por fim, são apresentados os resultados obtidos com a aplicação das heurísticas, permitindo identificar que a *First Fit* e *Worst Fit Decreasing* foram as mais apropriadas na solução do problema, com o escalonamento de equipamentos individualmente e considerando as dependências de funcionamento entre os equipamentos a *Branch and Price* apresenta-se como a solução mais viável.

Palavras-chave

Bin Packing, Biomassa, Escalonamento, Fotovoltaica, Geração Distribuída.

ABSTRACT

Title: A strategy for scheduling electricity consumption in distributed generation scenarios

Author: Frederico Deivson Ribeiro

Advisor: Dr. Raphael de Aquino Gomes

The multiplicity of energy generation sources, along with the need to use renewable alternatives, increases investment in distributed generation. This is particularly true in Brazil due to its climatic and economic conditions. The country has an excellent solar irradiance index for the production of photovoltaic electricity and a vast territorial extension with an economic model focused on agriculture and livestock raising with a meaningful amount of available biomass. However, to make the most of this potential, it is necessary to develop optimized solutions that allow finding the best consumption programming strategies, given the conditions for generating electricity. Therefore, this work presents the results of a strategy for the improvement of electrical energy consumption programming based on the Bin Packing problem. Adaptations to the main existing heuristics for this problem are proposed, as a way to provide a solution that enables the improvement of the energy potential in scenarios with distributed generation from photovoltaic and biomass systems. Initially, a proposal for modeling energy consumption and energy generation potential from photovoltaic and biomass sources is described. Then, through a case study, the results of the proposal are discussed considering the total available energy, functionality, and characteristics of electronic equipment. Finally, the results obtained with the application of heuristics are presented, which allows identifying that First-Fit and Worst Fit Decreasing were the most appropriate in solving the problem, with the scheduling of equipment individually and considering the operating dependencies between the pieces of equipment, Branch and Price is the most viable solution.

Keywords

Biomass, Bin Packing, Distributed Generation, Photovoltaic, Scheduling.

LISTA DE FIGURAS

2.1 Capacidade energética instalada no Brasil em Outubro de 2020.	29
2.2 Evolução da Geração Distribuída no Brasil	30
2.3 Sistema híbrido de fontes limpas para produção de energia.	34
2.4 Cadeia produtiva do biogás	36
2.5 Biodigestor modelo lagoa coberta.	37
2.6 Ciclo padrão Otto.	39
2.7 Quatro tempos do motor de Ciclo padrão Otto.	40
2.8 Média anual de irradiância no Brasil.	41
2.9 Média anual de irradiação no plano inclinado no Brasil.	42
2.10 Transformação das redes elétricas convencionais em redes inteligentes.	45
2.11 Exemplo de modelagem <i>Bin Packing</i> de pacotes.	50
2.12 Estrutura de árvore <i>Branch and Bound</i>	51
3.1 Influência da variação de irradiância na temperatura de 25° C.	62
3.2 Representação do problema de escalonamento de equipamentos como <i>Bin Packing</i> .	65
4.1 Área considerada como estudo de caso.	68
4.2 Consumo total elétrico do estudo de caso no dia 16 de setembro de 2020.	78
4.3 Produção elétrica total a partir de biomassa e fotovoltaica para o dia 16 de setembro de 2020.	79
4.4 Comparação de consumo e energia potencial em 16 de setembro de 2020.	80
4.5 Escalonamento dado pela heurística FF para o dia 16 de setembro de 2020.	80
4.6 Escalonamento dado pela heurística FFD para o dia 16 de setembro de 2020.	81
4.7 Escalonamento dado pela heurística BFD para o dia 16 de setembro de 2020.	81
4.8 Escalonamento dado pela heurística WFD para o dia 16 de setembro de 2020.	81
4.9 Escalonamento dado pela heurística SWFD para o dia 16 de setembro de 2020.	82
4.10 Diferença de consumo da concessionário entre a melhor e a pior heurística para 120 instâncias do problema.	86
4.11 Diferença de consumo de energia da concessionária quando as heurísticas chegam a resultados distintos, considerando todos os dias de 2019 (parte 1).	88
4.12 Diferença de consumo de energia da concessionária quando as heurísticas chegam a resultados distintos, considerando todos os dias de 2019 (parte 2).	88
4.13 Representação do agrupamento dos equipamentos no problema.	90
4.14 Tipos de caminhos na árvore que são buscados pelo DFS.	93
4.15 Escalonamento dado pela heurística FF com dependências para o dia 16 de setembro de 2020.	94

4.16 Escalonamento dado pela heurística FFD com dependências para o dia 16 de setembro de 2020.	94
4.17 Escalonamento dado pela heurística BFF com dependências para o dia 16 de setembro de 2020.	94
4.18 Escalonamento dado pela heurística WFD com dependências para o dia 16 de setembro de 2020.	95
4.19 Escalonamento dado pela heurística SWFD com dependências para o dia 16 de setembro de 2020.	95
4.20 Escalonamento dado pela heurística BP com dependências para o dia 16 de setembro de 2020.	95
4.21 Diferença de consumo de energia da concessionária quando as heurísticas chegam a resultados distintos, considerando todos os dias de 2019.	98

LISTA DE TABELAS

2.1	Evolução da produção elétrica nacional	28
2.2	Composição do biogás	35
3.1	Produção de efluente de suinocultura	54
3.2	Estimativa para a produção de efluentes conforme metodologia proposta	57
4.1	Modelo do consumo na propriedade para no dia 16 de setembro 2020	77
4.2	Produção total de efluentes no estudo de caso.	79
4.3	Resultados obtidos nas aplicações das heurísticas para o dia 16 de setembro de 2020.	82
4.4	Propriedades do conjunto de dados original.	83
4.5	Propriedades do conjunto de dados adaptado.	84
4.6	Resultados de aplicação das heurísticas para o dia 16 de setembro de 2020, excluindo casos em que todas obtiveram mesmo resultado.	85
4.7	Resultados de aplicação das heurísticas para o dia 16 de setembro de 2020, considerando apenas os casos em que há uma única heurística que obtém o melhor resultado.	86
4.8	Resultados de aplicação das heurísticas para todos os dias de 2019, excluindo casos em que todas obtiveram mesmo resultado.	87
4.9	Resultados de aplicação das heurísticas para todos os dias de 2019, considerando apenas os casos em que há uma única heurística que obtém o melhor resultado.	87
4.10	Capacidade de energia produzida e não utilizada, considerando todos os dias de 2019.	89
4.11	Resultados obtidos nas aplicações das heurísticas com dependência para o dia 16 de setembro de 2020.	96
4.12	Resultados de aplicação das heurísticas considerando dependências para todos os dias de 2019, excluindo casos em que todas obtiveram mesmo resultado.	96
4.13	Resultados de aplicação das heurísticas com dependências para todos os dias de 2019, considerando apenas os casos em que há uma única heurística que obtém o melhor resultado.	97
4.14	Capacidade de energia produzida e não utilizada, considerando todos os dias de 2019 com dependências.	98

LISTA DE QUADROS

2.1 Etapas de funcionamento de motores Ciclo Otto	39
2.2 Principais equipamentos utilizados em SFV	43
2.3 Descrição das heurísticas utilizadas	49
3.1 Caracterização dos animais da suinocultura	53
3.2 Analogias entre <i>Bin Packing</i> e problema de escalonamento de equipamentos. . .	66

LISTA DE ALGORITMOS

4.1	First-Fit(e, h)	72
4.2	First-Fit-Decreasing(e, h)	73
4.3	Best-Fit-Decreasing(e, h)	74
4.4	Worst-Fit-Decreasing(e, h)	75
4.5	Second-Worst-Fit-Decreasing(e, h)	76
4.6	Pricing (Φ, h)	91
4.7	DFS (i, p)	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIEC	Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes
AF	<i>Any Fit</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AP	Audiência Pública
AWFD	<i>Almost Worst Fit Decreasing</i>
BFD	<i>Best Fit Decreasing</i>
BLC	Biodigestores de Lagoa Coberta
BP	<i>Branch and Price</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CD	Cargas Deslocáveis
CF	Cargas Fixas
CONPET	Programa Nacional de Racional Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural
DFS	<i>Depth First Search</i>
EE	Eficiência Energética
EPE	Empresa de Pesquisa e Energia
FDI	Fator de Dimensionamento do Inversor
FF	<i>First-Fit</i>
FFD	<i>First Fit Decreasing</i>
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLD	Gerenciamento do Lado da Demanda
GMG	Grupo de Moto Gerador
HSP	Hora de Sol Pleno
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PBP	<i>Problema do Bin Packing</i>
PBPD	<i>Problema do Bin Packing com Dependência</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PMS	Ponto Morto Superior
PNE	Plano Nacional de Energia
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
RD	Resposta a Demanda
REDs	Recursos Energéticos Distribuídos
RN	Resolução Normativa
SCL	Sistema de Contabilização e Liquidação
SFV	Sistema Fotovoltaico
SGs	<i>Smart Grids</i>
SH	Smart Home
SIN	Sistema Integrado Nacional
SV	Sólido Voláteis
SWFD	<i>Second Worst Fit Decreasing</i>
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
UCs	Unidades Consumidoras
UFV	Usinas Fotovoltaicas
WFD	<i>Worst Fit Decreasing</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Peso do problema do bin packing
β_0	Capacidade de produção de metano pelo dejetos
C_{EE}	Conjunto de equipamentos elétricos
CH_4	Metano
c_j	Consumo de energia elétrica em kWh
C_m	Consumo médio mensal em kWh/mês
CO_2	Dióxido de carbono
COV	Carga orgânica volumétrica
C_s	Consumo específico
Δ	Emissão de metano durante o manejo de dejetos
D_m	Número médio de dias de utilização do equipamento mês
E	Consumo diário médio anual da edificação
E_{QE}	Equipamentos elétricos
F_{DC}	Fração diária de confinamento
FEM	Fator de emissão de metano por animal da categoria
FCM	Fator de conversão de acordo com o manejo
G	Irradiância global no plano horizontal
G_b	Irradiância direta
G_d	Irradiância difusa
$G_{\beta\gamma}$	Irradiância global incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção
$G_{b\beta\gamma}$	Irradiância direta incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção
G_s	Irradiância difusa incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção
G_γ	Irradiância de albedo incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção
GWh	Gigawatt-hora
H_2	Hidrogênio
H_2O	Água
H_2S	Sulfeto de hidrogênio
$hm_{inicial}$	Hora inicial de funcionamento
hm_{final}	Hora final de funcionamento
HSP_{MA}	Média diária anual das horas de sol plico incidentes no plano do módulo fotovoltaico
I	Corrente
$I_{\beta\gamma}$	Irradiação global horária incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção
$I_{b\beta\gamma}$	Irradiação direta horária incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção

I_s	Irradiação difusa horária incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção
I_γ	Irradiação albedo horária incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção
j	Categoria de animais
k	categorias de suínos
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-hora
L	Litros de dejetos
Λ_h	Consumo total nesta hora
MW	Megawatt
n	Quantidade de equipamentos
N	Número de animais
N_d	Número médio de horas diárias de utilização do equipamento
N_e	Potência efetiva
N_2	Nitrogênio
NH_3	Amônia
η_τ	Rendimento Total
O_2	Oxigênio
P_α	Potência do gerador
P_e	Potência nominal do equipamento em Watts
PCI	Poder calorífico inferior
PDB	Produção diária de biogás
$PDDb$	Produção diária de dejetos por bovinos da categoria
$PDDs$	Produção diária de dejetos por suínos da categoria
PDM	Produção de dejetos por matriz
PE	Produção de dejetos por animal em questão
P_{FV}	Potência de pico do módulo fotovoltaico
P_h	Preço da eletricidade contratada no momento do consumo
P_m	Potência absorvida pelo gerador no eixo do motor
PM	Peso médio
P_{Nca}	Potência nominal em corrente alternada do inverso
PP	Peso padrão
Q	Substrato produzidos diariamente
$R_{s,c}$	Radiação solar diária
S_0	Concentração de sólido volátil no substrato
SM	Fator do sistema de gerenciamento dos resíduos
t	Número de tipos de animais
T	Torque
TC	Horas de confinamento por dia
TD	Taxa de desempenho
T_j	Tempo de duração de utilização
TRH	Tempo de retenção hidráulica
V	Volume
V_t	Tensão
χ	item problema do bin packing
ω	Velocidade angular

ω_j	Potência nominal do equipamento
W_p	Watts pico
Y	Pacote do problema do bin packing
z	Categorias de bovino

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE QUADROS	13
LISTA DE ALGORITMOS	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
LISTA DE SÍMBOLOS	17
1 INTRODUÇÃO	22
1.1 Objetivos	26
1.2 Estrutura do trabalho	26
2 REFERENCIAL TEÓRICO	27
2.1 Geração distribuída no Brasil	27
2.2 Regulamentação	30
2.2.1 Políticas públicas de incentivo para uso de eficiência energética e resposta a demanda	32
2.3 Produção de energia elétrica em modelos híbridos	33
2.3.1 Produção de energia elétrica por fontes de biomassa	34
2.3.1.1 Tecnologia para conversão de biogás	38
2.4 Produção de energia elétrica a partir de irradiação solar	40
2.5 Resposta a demanda	44
2.5.1 Escalonamento de consumo	46
3 MODELAGEM PROPOSTA PARA O CENÁRIO	52
3.1 Produção elétrica por biomassa	52
3.1.1 Quantificação dos dejetos da suinocultura	52
3.1.2 Quantificação dos dejetos da bovinocultura	54
3.1.3 Produção de biogás	55
3.1.4 Aspectos técnicos de biodigestores lagoa coberta	57
3.1.5 Aspectos técnicos da conversão do biogás em energia elétrica	58
3.2 Sistemas fotovoltaicos	59
3.3 Consumo elétrico	63
3.3.1 Programação do consumo de eletricidade como um problema de <i>Bin Packing</i>	65
4 ESTRATÉGIA PARA ESCALONAMENTO DE CONSUMO	67
4.1 Propriedade usada como estudo de caso	67
4.1.1 Manejo da propriedade	68
4.2 Aplicação do PBP	69
4.2.1 <i>First Fit</i>	71

4.2.2	<i>First Fit Decreasing</i>	72
4.2.3	<i>Best Fit Decreasing</i>	73
4.2.4	<i>Worst Fit Decreasing</i>	74
4.2.5	<i>Second Worst Fit Decreasing</i>	75
4.3	Avaliação inicial das heurísticas propostas considerando o estudo de caso	76
4.4	Análise de mais cenários do problema	83
4.5	Inclusão das dependências entre os equipamentos	89
4.5.1	Resultados para o dia 16 de setembro de 2020	93
4.5.2	Resultados considerando todos os demais cenários	96
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	101
5.2	Publicações	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda por energia elétrica para atender as necessidades humanas, a população mundial tem voltado suas atenções para soluções menos poluentes, e de menor custo, baseadas em fontes renováveis. Com o avanço das tecnologias melhorou-se consideravelmente materiais, métodos e estruturas. Juntamente com o avanço de sistemas computacionais que se faz presente de forma direta ou indiretamente em quase tudo que está em nossa volta, está sendo possível reformular toda a matriz energética mundial (FARIA, 2016).

O Brasil tem caminhado devagar no sentido de encontrar meios sustentáveis ou otimizar seus recursos para melhor aproveitar suas diversidades (REIS, 2011). Soluções energéticas provindas de recursos primários limitados estão se tornando cada vez mais escassos, lançando na atmosfera resíduos de altíssima periculosidade para o meio ambiente. A queima de combustíveis fósseis tem provocado uma alta emissão de CO_2 na atmosfera terrestre acelerando o efeito estufa e contribuindo com o aquecimento global. No que diz respeito aos resíduos nucleares os problemas são ainda maiores uma vez que o destino ainda é incerto e os desastres históricos indicam as grandezas de sua problemática (ARAUJO, 2016).

A matriz elétrica brasileira será eficaz quando na sua composição estiver fontes geradoras de diversos tipos, não havendo total dependência de uma determinada fonte produtora (REIS, 2011). Com este objetivo o sistema elétrico brasileiro possui uma visão focada no futuro com planos e trabalhos em andamento para a implementação de uma rede elétrica nacional inteligente. Com incentivos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as concessionárias de energia elétrica investem 0,5% da sua arrecadação em sistemas tecnológicos que estão otimizando a produção, transmissão e distribuição de energia elétrica no território nacional. Isso gerará um impacto considerável na matriz elétrica brasileira, ainda mais com o avanço da Geração Distribuída (GD) em plena expansão (KAGAN et al., 2013).

Está previsto no planejamento para Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da ANEEL (ANEEL, 2010), incentivo para impulsionar o avanço e o uso de novas fontes energéticas no Brasil. Iniciativas como esta contribuem positivamente com a matriz elétrica brasileira, ainda mais com o avanço de energia elétrica provindas de fontes sustentáveis (fotovoltaico, eólico, biogás, maré motriz entre outras) (KAGAN et al., 2013).

A GD também gera impactos positivos no meio ambiente com a diminuição da emissão de CO_2 e Gases de Efeito Estufa (GEE) (REIS, 2011). Contudo, integrações de

GD somente serão viáveis com a aplicação das *Smart Grids* (SGs), ou redes elétricas inteligentes. As SGs devem ser interpretadas como um conceito e não uma tecnologia específica. As SGs são redes elétricas que usam tecnologia de informação, sensoriamento e automação com o objetivo de fornecer energia elétrica de forma eficiente, confiável e segura (TOLEDO, 2012). Um dos pontos importantes das SGs é fazer a convergência de tecnologias para o controle e balanceamento de redes com GD (MOREIRA, 2017).

Atualmente, é possível que diversas fontes produtoras de energia elétrica possam trabalhar em conjunto para atingir as necessidades requeridas de uma demanda. Sistemas híbridos representam uma forma importante para a produção de energias renováveis, combinando diversas fontes primárias e considerando condições específicas de cada uma delas (REIS, 2011). Dentre estas fontes o Brasil é detentor de um potencial acima da média para exploração e produção de energia elétrica provenientes de fontes fotovoltaicas e biomassa. O Brasil conta com uma excelente disponibilidade de radiação solar, que é quase o dobro das disponíveis em países da Europa (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Além disso, devido à extensão territorial brasileira, diversidade agrícola, ecossistemas e condições climáticas favoráveis, tem-se disponibilidade de diferentes tipos de matéria-prima para geração e cogeração de energia elétrica utilizando biomassa (ARAUJO, 2016).

No Brasil é possível aproveitar melhor os recursos energéticos fazendo uso de tecnologias já consolidadas conectando diversidades, tecnologias e eficiência. É possível otimizar o consumo de energia elétrica privilegiando a geração própria e reduzindo o consumo de energia elétrica das concessionárias. Uma solução é a implementação de estratégias e medidas que enquadre a Resposta a Demanda (RD), conforme estabelecido na Resolução Normativa ANEEL nº 792, de 28 de novembro de 2017 (BRASIL, 2017).

A RD é um conjunto de medidas que visa otimizar o consumo de energia elétrica de acordo a oferta disponível. Para atingir este fim são usados métodos e estratégias para redução e deslocamento do consumo para fora dos horários de pico onde o valor do Kilowatt-hora (kWh) de energia elétrica é menor. Existem dois tipos de RD, sendo um baseado em preço e o outro baseado em incentivos (BRASIL, 2019). Neste conjunto de medidas está o Gerenciamento do Lado da Demanda (GLD) que é um planejamento de ações que visa mudar a curva de carga de consumo (GARCIA, 2002). GLD são medidas classificadas como direta e indireta, divididos em 07 estratégias (GELLINGS, 1985):

1. Redução de pico;
2. Conservação estratégica;
3. Preenchimento de vales;
4. Crescimento estratégico da carga;
5. Curva de carga flexível;
6. Deslocamento de carga; e
7. GD.

Em grande parte dos trabalhos relacionados a produção de energias limpas e renováveis foi possível observar que este modelo de produção de energia tem caminhado a passos largos com a avanço da tecnologia, proporcionando aumento da eficiência. Dentre estes, [Moreira \(2017\)](#) faz um levantamento das práticas adotadas para produção de diversas fontes limpas usadas para produção energética. São citadas as metodologias, práticas e avanços voltados para estas questões. No tocante à produção de energia elétrica fotovoltaica, [Villalva e Gazoli \(2012\)](#), [Zilles et al. \(2016\)](#) apresentam conceitos aplicados à estruturação deste tipo de fonte para aplicações e dimensionamentos de estruturas. Para produção de energia produzida por biomassa, [EMBRAPA \(2018\)](#) foca seus estudos em cálculos de produção de biogás baseados na quantidade de matéria-prima disponível em relação ao tamanho e forma de manejo de rebanhos. Com relação a outro ponto importante para produção deste tipo de energia, [Coelho et al. \(2018\)](#), [Rohstoffe \(2010\)](#) apresentam metodologias para a implementação de sistemas de produção e uso de biomassa juntamente com suas condições de disponibilidade, quantificação energética, análise de viabilidade técnica e econômica.

[Reis \(2011\)](#) apresenta diversas metodologias para produção de energia elétrica, com destaque para aquelas baseadas em modelos híbridos. A produção de energia neste modelo é uma opção considerável para solucionar problemas de sazonalidade e complemento energético. O autor discute as principais práticas de aplicação e conceitos relacionados.

As tecnologias de inteligência e modelagem computacional podem ter um valor estratégico significativo nesta área devido à sua flexibilidade inerente em lidar com diferentes caminhos de evolução do sistema elétrico, conforme afirmam [Konstantelos et al. \(2016\)](#). De forma direta, os autores demonstram a importância do uso da modelagem computacional para o dimensionamento e testes virtuais de sistemas elétricos com o intuito de aumentar a segurança da rede, diminuir custo na implementação, monitoramento da estrutura e rapidez em tempo de solução para reparos. Outra grande vantagem na implementação de sistemas computacionais em redes elétricas é a transformação das mesmas em estruturas inteligentes, possibilitando seu uso para transporte de informações e controle. Nesta vertente, usando modelagem computacional, [Xu et al. \(2016\)](#) propuseram um algoritmo que distribui a carga em redes elétricas inteligentes. A estratégia considera uma área específica de interesse no sistema de distribuição e se baseia na redução da escala de problemas, minimizando os efeitos negativos.

De forma complementar, há resultados que, apesar de não estarem relacionados de forma direta com o escopo do trabalho aqui apresentado, possuem similaridade por se basearem em otimização e modelagem computacional aplicada. Neste conjunto, há trabalhos relacionados à otimização de rotas para transporte de carga juntamente com as condições de logísticas sobre os aspectos de rotas e volume, conforme apresentam

Rosin et al. (2009). Neste trabalho os autores propõem três heurísticas para a solução do problema e são apresentados resultados de experimentos computacionais. Em outra frente muito explorada no tocante a otimização estão os trabalhos relacionado a otimização de elementos computacionais tal como escalonamento de processos e tráfego de informações em redes. Capua (2017) apresenta em seu trabalho novos métodos de resoluções para duas variantes de otimização combinatória que surgem em diversas aplicações reais. A autora utiliza métodos heurísticos e exatos para resolver duas classes variantes de casos de otimização clássicos do universo computacional utilizando meta-heurísticas e modelo matemático de programação linear inteira mista.

De maneira geral, há ausência de trabalhos que buscam modelar e otimizar o consumo de energia elétrica em cenários de geração distribuída. Apesar de haver diferentes trabalhos (NAN et al., 2018; MOHAGHEGHI et al., 2010; ZHU et al., 2012; NWULU; XIA, 2017) com propostas para resposta a demanda, cenários com produção conjunta de energia fotovoltaica e por biomassa são praticamente inexplorados. Diante disso, este trabalho visa propor uma estratégia baseada no escalonamento do consumo em sistemas que utilizam GD em modelo híbrido. Fundamentalmente foi preciso realizar o levantamento do potencial de produção de energia elétrica a partir de Sistema Fotovoltaico (SFV) e biomassa disponível, além de compreender o consumo elétrico juntamente com os tipos de equipamentos e o regime de utilização dos mesmos. Após os levantamentos realizados (produção e consumo) os dados são processados através de modelos computacionais onde são analisadas diversas heurísticas para otimizar o consumo de energia elétrica disponível, tendo como objetivo principal reduzir o uso da energia elétrica proveniente da concessionária.

Com o intuito de instrumentar a estratégia proposta é utilizado um cenário como estudo de caso aplicado em uma fazenda no município de Uruaçu, Estado de Goiás que trabalha com a suinocultura e bovinocultura leiteira. A escolha desta propriedade como estudo de caso se deve ao fato que a mesma reúne condições favoráveis para receber um projeto de GD com adição de fonte incentivada de energia em modelo híbrido. Além do estudo de caso foram realizados experimentos de simulação computacional visando explorar um conjunto mais amplo de cenários utilizando dados sintéticos. A estratégia proposta neste trabalho considera os coeficientes de energia em potencial disponíveis a partir de um projeto de sistema. O intuito é que esta metodologia possa ser utilizada em outros casos que possuam disponibilidade energéticas similares ou até mesmo de outras fontes, mediante as devidas expansões.

A metodologia de análise desenvolvida poderá ser utilizada como ferramenta de apoio para tomada de decisões na replicação deste estudo para outras unidades rurais tal como a propriedade utilizada no estudo de caso. Diante disso, o estudo apresentado poderá ser usado como modelo e replicado, estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias

e a criação de hábitos eficientes do consumo da energia disponível.

1.1 Objetivos

O objetivo geral é propor uma estratégia de escalonamento de consumo levando em consideração cenários utilizando GD realizando ações que visam alterar a curva de carga de consumo como forma de reduzir o uso da energia elétrica fornecida por concessionárias. Os objetivos específicos consistem em:

- Modelar o problema a partir de dados coletados e análise dos cenários;
- Definir o melhor arranjo estrutural do funcionamento dos equipamentos elétricos para alteração do consumo baseada em disponibilidade energética;
- Apontar medidas de eficiência para alterar a curva de carga do consumo realizando melhor uso e distribuição da energia elétrica produzida;
- Fazer o levantamento do potencial energético de biomassa e fotovoltaico disponíveis, usando como base o estudo de caso;
- Analisar o consumo elétrico da propriedade usada no estudo de caso;
- Estabelecer estratégias para escalonamento de consumo de energia elétrica; e
- Validar a solução proposta considerando as condições do estudo de caso e um conjunto amplo de cenários adicionais.

1.2 Estrutura do trabalho

O restante do trabalho está organizado de acordo com a seguinte estrutura:

No Capítulo 2 está descrito o referencial teórico abordando os aspectos técnicos para a produção de energia provindas de biomassa e fotovoltaico em modelo de GD, além de padrões de consumo, projeções, ações e metas GLD para o planejamento energético.

No Capítulo 3 é apresentada a modelagem do potencial de geração e do consumo de energia elétrica, descrevendo os elementos estruturais, físicos e funcionais do cenário considerado, levando em consideração os atributos do potencial energético disponível.

No Capítulo 4 é estabelecida a estratégia de melhoria do escalonamento de consumo proposta. Inicialmente é descrita a propriedade rural usada como estudo de caso. Em seguida, é discutido a implementação das heurísticas, tendo como base os algoritmos propostos. Também são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da proposta considerando o estudo de caso e outros cenários gerados através de simulação.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais do trabalho, o que inclui a sistematização dos resultados obtidos, descrição dos trabalhos futuros e discussão das contribuições oferecidas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como objetivo apresentar conceitos essenciais ao desenvolvimento do trabalho. Mais precisamente, são discutidos os aspectos que dispõem a composição da matriz elétrica nacional, o avanço das demandas energéticas nacionais, avanço da Geração Distribuída no setor elétrico brasileiro, condições para produção de energia a partir de fontes menos impactantes em modelos híbridos, resposta a demanda e modelagem computacional para otimização.

2.1 Geração distribuída no Brasil

A atual matriz energética mundial tem como fonte principal de energia os combustíveis fósseis que são fontes limitadas e provocam impactos nocivos ao meio ambiente devido a sua alta emissão de CO_2 e outros GEE. Com a escassez do petróleo e outras fontes fósseis, a humanidade está avançando a passos largos as tecnologias para a produção de energia limpa proveniente de fontes diversas como a biomassa, solar, nuclear, eólica, geotérmica, hidrelétrica, hidrogênio, etc, que são menos impactantes para o meio ambiente (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

O conceito de energia limpa é frequentemente associado às fontes renováveis. Em comparação com os combustíveis fósseis apresentam menores impactos ambientais e geram poucos resíduos ou emissões de poluentes. Entretanto, a exploração de qualquer fonte de energia provoca alterações no meio ambiente e produz impactos de maior ou menor relevância (ANEEL, 2008).

A matriz energética brasileira foi criada em estrutura bastante diversificada. Naturalmente foi arranjada com importante participação de energias sustentáveis. A energia produzida nas hidrelétricas ainda é a sua maior fonte renovável, com oferta interna na ordem de 396.381 Gigawatt-hora (GWh) em 2021 com base nos dados de 2020 (EPE, 2021). No entanto, a bioenergia supera a energia hidrelétrica, quando somadas todas as capacidades instaladas a partir de biomassa (biocombustíveis sólidos, líquidos e gasosos) provida de diversos setores agrícolas e industriais do Brasil. Esta condição está diretamente relacionada à base econômica do país (PEDROSO et al., 2018).

A energia elétrica é um serviço de utilidade pública no Brasil. De acordo com o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2019 quase que a totalidade de domicílios do País (99,8%) tinha acesso à energia elétrica. Somente 0,2% que é um número de aproximadamente 730 mil domicílios não possuíam fornecimento

de energia elétrica (IBGE, 2019b). Mesmo com esta parcela da população sem acesso a este benefício, ocorre uma forte expansão da demanda influenciada pelas necessidades crescentes. Com o aumento da renda per capita no Brasil houve também um aumento da capacidade de aquisição de produtos eletroeletrônicos, gerando maior consumo. O aumento do consumo relaciona-se intimamente com as premissas do crescimento econômico (MUELLER, 2004).

Conforme descrito no Plano Nacional de Energia (PNE) 2030 (EPE, 2008), o setor energético nacional deve promover a eficiência energética em função dos custos energéticos crescentes em todo o mundo, do maior uso de fontes sustentáveis para suprir o atendimento energético que é um desafio, da segurança energética, dos custos relacionados com transporte e distribuição, geração de renda e condições ambientais. A eficiência energética tornou-se um ponto imprescindível para o desenvolvimento sustentável de um país. De acordo aos estudos de potenciais, perspectivas, revisões, o PNE apresenta propostas de estratégias de longo prazo para atingir a meta de conservação de energia prevista para o país. São abordadas as questões gerais, tais como a política e o plano nacional de eficiência energética, questões estruturantes, redução de desperdício, questões operacionais e inserção de equipamentos mais eficientes.

De acordo com os dados do banco de dados do Sistema Integrado Nacional (SIN) (ONS, 2021), a energia despachada superou a marca de 172.290 MW em 2020. Em 2015 este valor era de apenas 140.272 MW (ANEEL, 2019), representando um aumento de 22,85% em cinco anos. O número de Unidades Consumidoras (UCs) conectadas à rede do SIN superou a marca de 85.071.000 em 2019 superando as 79.107.000 UCs que haviam em 2015, aumento de 7,53%. Ao todo, tivemos um aumento de 50.881.038 Kilowatt (kW) no potencial instalado na matriz elétrica nacional no período de 2013 a 2018 com destaque para a GD que teve um aumento de 633,6%, conforme apresentada na Tabela 2.1

Tabela 2.1: *Evolução da produção elétrica nacional*

Indicadores	2013	2018	Var. Período	Var. Anual
Energia despachada ao SIN - média mensal (GWh)	42.778	45.321	5,90%	1,16%
Potência instalada total (kW)	126.754.659	163.654.468	29,10%	5,24%
Potência instalada de usinas: eólicas, outras (kW)	2.206.694	16.187.923	633,60%	48,97%
Unidades consumidoras (quantidade)	74.678.022	83.576.144	11,90%	2,28%

Fonte: (ANEEL, 2019).

Conforme descrito no boletim de monitoramento do sistema elétrico de outubro de 2020 da ANEEL (MME, 2021), a capacidade instalada total de geração de energia elétrica do Brasil atingiu 177.671 Megawatt (MW), considerando a GD. Em comparação ao mesmo mês do ano de 2019, houve um acréscimo de 8.069 MW, (4,8%), com destaque para 3.246 MW de geração de fonte solar e 1.866 MW de fontes térmicas. A geração distribuída alcançou, no mês de outubro de 2020, 4.078 MW instalados em 321.003 unidades, resultando em 83,43% de crescimento em 2020 (148,6% nos últimos 12 meses) e 2,3% da matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica. Na Figura 2.1 são apresentados os percentuais da capacidade energética no Brasil conforme a fonte de geração.

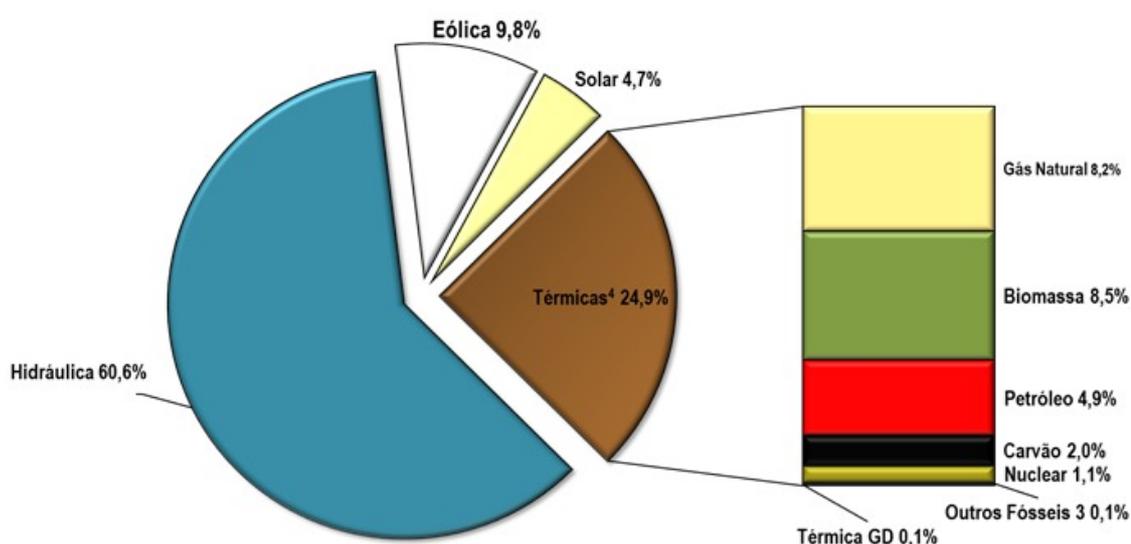


Figura 2.1: Capacidade energética instalada no Brasil em Outubro de 2020.

Fonte: (MME, 2021).

A GD apresenta particularidades dependendo da localidade e do tipo de fonte usada para a produção. Adota-se como definição para GD aquela geração de energia localizada próxima ao consumidor final, cuja instalação objetiva atendimento prioritário a este, podendo ou não gerar excedentes energéticos comercializáveis para além das instalações do consumidor final (BRASIL, 2013). A partir de 2014 passou-se a analisar e apurar os dados sobre GD com mais acurácia e observou-se um aumento exponencial do avanço desta categoria elétrica, onde todos os anos houve recordes na produção, conforme apresentado na Figura 2.2.

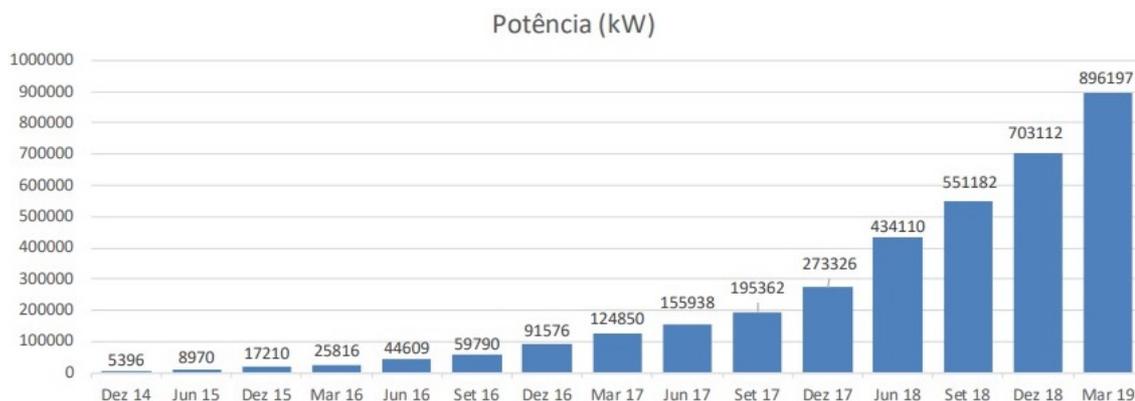


Figura 2.2: *Evolução da Geração Distribuída no Brasil*

Fonte: (ANEEL, 2019).

Dentre as tecnologias das fontes energéticas alternativas e renováveis, consolidadas para serem empregadas comercialmente, a energia solar fotovoltaica é a energia obtida por meio da conversão direta da luz em eletricidade. Este tipo de energia possui a maior viabilidade econômica para aplicação em instalações de pequenas e médias unidades consumidoras (REIS, 2011). Por outro lado, no uso de biomassa como matéria-prima para a produção de energia elétrica, se faz necessário o uso de processos modernos com elevada eficiência tecnológica. A mesma também possui flexibilidade no fator energético, tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transporte (CORTEZ, 2008).

2.2 Regulamentação

Com intuito de reduzir as barreiras para a penetração da GD de pequeno porte, a ANEEL, através da Resolução Normativa (RN) nº 482 de 17 de abril de 2012 (BRASIL, 2012), estabelece regras que incluem a microgeração, com até 100 kW de potência, e a minigeração, de 100 kW a 1 MW. Esta resolução estabelece também o sistema de compensação de energia, que permite ao consumidor instalar pequenos geradores em sua unidade consumidora e trocar energia com a distribuidora local. As condições do regulamento são válidas para geradores que utilizem fontes incentivadas de energia: hídrica, solar, biomassa, eólica e cogeração qualificada (BRASIL, 2012).

A RN nº 482 estabeleceu as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, e criou o sistema de compensação de energia elétrica correspondente. Na prática, se a energia injetada na rede pelo micro ou minigerador for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia kWh na próxima fatura, disponível por até 36 meses. A compensação pode

variar conforme o grupo que o cliente está enquadrado. Os consumidores de Grupos A e B tem modelos de compensação diferentes entre eles (BRASIL, 2012).

Em 24 de novembro de 2015 foi criada a RN nº 687 (BRASIL, 2015). Suas regras passaram a valer a partir do dia 1º de março de 2016 onde sua principal função foi revisar a regulamentação do segmento de GD no país. Um dos seus destaques foi a criação de 03 (três) modalidades de GD com o surgimento de um novo grupo de consumidores, além de ampliar os negócios no segmento de geração por micro e minigeradores distribuídos. Com a entrada da RN nº 687 houve uma acesso maior de consumidores, com maior ciência dos benefícios da energia solar fotovoltaica, que fomentou e triplicou a quantidade de SFV instalados no Brasil.

Entre as mudanças está a ampliação das fontes que poderão ser caracterizadas como micro ou minigeração e também a redefinição dos limites de energia gerada. Na minigeração, a potência instalada, que antes precisava ser superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW, agora poderá ter até 5 MW, menos a geração hidrelétrica, que poderá ter, no máximo, 3 MW. Já na microgeração, que tinha que ter potência instalada menor ou igual a 100 kW, agora caiu para 75 kW (BRASIL, 2015).

Dentro da RN nº 687 a ANEEL aprovou as regras de comercialização de energia elétrica aplicáveis ao Sistema de Contabilização e Liquidação (SCL) com o objetivo de alterar a RN nº 482. Regulamenta contribuições recebidas na Audiência Pública (AP) nº 039/2015. Utiliza o Anexo II da Nota Técnica no 215/2015–SRM/ANEEL, nos módulos I ao XII (garantia física, contratos, tratamento de exposições, entre outros) (BRASIL, 2012).

A compensação de energia é primordial para o avanço da GD. Atualmente existe um empasse entre concessionárias e consumidores. As concessionárias alegam que o sistema de compensação atual não está trazendo vantagens financeiras adequadas, já os consumidores estão satisfeitos com o modelo atual e alegam a importância desta estrutura para a manutenção e a consolidação do mercado. Para solucionar estes empasses a ANEEL realizou a Consulta Pública 10/2018 para iniciar os trabalhos de discussões, concluindo e apontando soluções para o crescimento sustentável. Em continuidade, estabeleceu-se a Consulta Pública 01/2019 de 24/01/2019 a 19/04/2019 para receber contribuições à proposta de revisão. Realizou-se em três capitais: Brasília, Fortaleza e São Paulo, onde foram recebidas 272 contribuições documentais, e 106 exposições presenciais (BRASIL, 2018).

De acordo a RN nº 792 de 28 de Novembro de 2017 (BRASIL, 2017) a ANEEL estabeleceu os critérios e as condições do programa de redução de demanda que visa diminuir o consumo de energia elétrica dos consumidores com planos e ações para alterar a curva de carga de consumo. A Nota Técnica 022 de 09 de Julho de 2019 da Empresa de Pesquisa e Energia (EPE) pertencente ao Ministério de Minas e Energia (MME) define a redução de demanda como um mecanismo que gerencia o consumo de acordo com

as condições de oferta de energia elétrica. Um exemplo prático de redução de demanda é a transferência de consumo para fora do horário de pico da rede de uma localidade, mudando o perfil de consumo dos usuários (BRASIL, 2019).

2.2.1 Políticas públicas de incentivo para uso de eficiência energética e resposta a demanda

Os governos das esferas federais, estaduais e municipais juntamente com a iniciativa privada, a partir da consolidação da RN 482, estão trabalhando de forma conjunta para incentivar a produção e distribuição de energia elétrica a partir de fontes menos impactantes. Estes incentivos estão sendo concedidos para fomentar a introdução de novas tecnologias e melhorar o sistema elétrico nacional. Os principais objetivos são de aumentar a eficiência do sistema elétrico nacional, diversificar as fontes de produção e dar uma melhor confiabilidade ao mesmo (ANEEL, 2008).

Para atingir os planos e metas nacionais de melhoramento energético foram criados alguns planos e ações de Eficiência Energética (EE) (EPE, 2008) como os reconhecidos internacionalmente Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) (INMETRO, 2001), o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) (ELETROBRAS, 2005) e o Programa Nacional de Racional Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET) que está contido dentro do PBE.

Conforme previsto na Lei nº 10.295, de 17 de Outubro de 2001 (BRASIL, 2001), Lei de Eficiência Energética, que visa a alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente com base em valores técnica e economicamente viáveis, considerando a vida útil das máquinas e aparelhos consumidores de energia. Através desta lei foi possível estabelecer programas e metas para os fabricantes de produtos eletroeletrônicos, os níveis máximos de consumo de energia e mínimos de eficiência (BRASIL, 2001).

Está previsto no Plano Nacional de Eficiência Energética diretrizes a longo prazo, tal como o PNE 2030 (EPE, 2008). No PNE 2030 estão estabelecidas metas para economia reduzindo a demanda em 10% até 2030 com aplicação de EE. O objetivo do PNE é diminuir o desperdício de energia elétrica e preservar recursos naturais através da implementação de tecnologias e ações entre governo e sociedade privada orientado a captação de recursos (MME, 2011).

Diante desta conjuntura e das amplas possibilidades com incentivos legislativos e naturais disponível no Brasil a GD deve ser melhor explorada. São diversos os motivos que justificam o desenvolvimento de estratégias que possibilitem explorar os benefícios destas questões como, por exemplo, melhorar e potencializar o alto consumo com medidas inteligentes, diminuindo o consumo de energia elétrica providas de concessionárias.

2.3 Produção de energia elétrica em modelos híbridos

Atualmente é possível que soluções diferentes possam trabalhar em conjunto e serem usadas para atingir o mesmo fim. Sistemas híbridos representam uma forma importante para a produção de energias renováveis, combinando diversas fontes primárias e considerando condições específicas de cada uma delas (REIS, 2011). O Brasil é detentor de um potencial acima da média para exploração e produção de energia elétrica provenientes de fontes fotovoltaica e biomassa. O país conta com uma excelente disponibilidade de radiação solar, que é quase o dobro da disponível em países da Europa. A energia fotovoltaica tem origem na energia captada do sol através da fotossíntese, que é a conversão da luz solar em energia química (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Ademais, devido à sua extensão territorial, diversidade agrícola, ecossistemas e condições climáticas favoráveis, o Brasil tem disponibilidade de diferentes tipos de matéria-prima para geração e cogeração de energia elétrica utilizando biomassa (ARAUJO, 2016).

Em localidades onde há mais de uma fonte renovável de matéria-prima para a produção de energia elétrica destaca-se, dependendo da aplicação, combinações em um único sistema de produção confiável e flexível. Essa combinação introduz a definição de sistema híbrido de energia, ou simplesmente sistema híbrido. Define-se esse sistema como utilizador com mais de uma fonte de energia que depende da disponibilidade dos recursos. As somatórias destas fontes deverão gerar e distribuir energia elétrica, de forma otimizada e com custos mínimos, a uma determinada carga ou a uma rede elétrica, isolada ou conectada a outras redes. Dada a possibilidade de uma fonte suprir a falta temporária de outra, esse tipo de sistema tem capacidade de operar com menor risco de interrupção (BARRETO; PINHO, 2008).

Em sistemas híbridos é possível obter um resultado melhor na produção de energia elétrica evitando desperdícios e obter redução do custo do kWh tornando este tipo de geração mais atrativa em relação aos sistemas tradicionais. Através de modelagem e análise prévia é possível realizar a projeção ideal para otimizar as fontes energéticas disponíveis no local, diminuindo os custos com a implementação e promovendo uma melhor utilização dos recursos (VIANA, 2010). Contudo, para que haja uma melhor penetração deste tipo de estruturação no mercado será necessário mais incentivos, nova modelagem dos sistemas que serão implementados e estruturação dos projetos já consolidados, legislação mais específica, transparência e maior credibilidade (FILHO et al., 2019).

Geração em modelos híbridos podem ser dos tipos *on-grid* que estão conectadas às redes elétricas de concessionárias ou *off-grid* que são autônomas e não necessariamente estão conectadas diretamente a redes de concessionárias. Em ambos os casos este modelo representa geração alternativa que irá suprir a demanda de uma localidade específica ou região. A Figura 2.3 ilustra um diagrama da produção dos tipos de energia a partir de

fontes limpas em um modelo híbrido: *i)* módulo fotovoltaicos; *ii)* turbinas eólicas; *iii)* geradores à biogás; *iv)* queima de biomassa para geração de calor em caldeiras; ou *v)* maremotriz. A partir destas fontes é possível obter energia elétrica ou calorífica. Em especial, na produção de biogás é possível que haja o armazenamento e o uso do mesmo em momentos apropriados transformando-o em energia em potencial para sua otimização. É possível também alterar o ângulo dos módulos para alterar o pico de produção dos mesmos e otimizar o alto consumo. Em sistemas que estão conectados à rede elétrica de concessionárias é possível enviar todo o excedente da produção e reaver em créditos posteriormente.

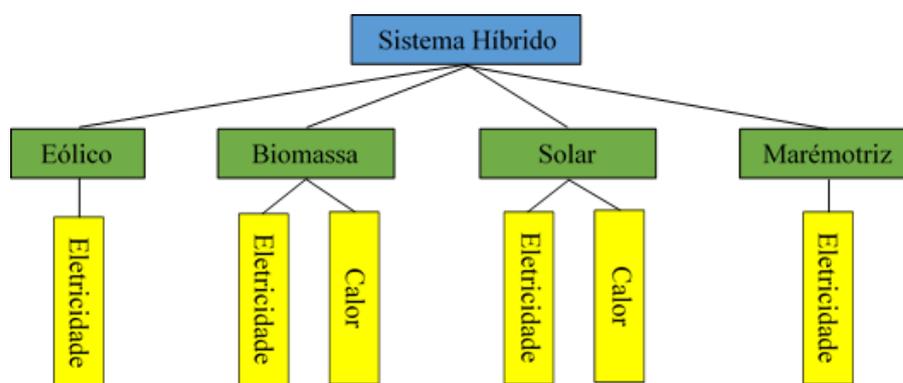


Figura 2.3: Sistema híbrido de fontes limpas para produção de energia.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

2.3.1 Produção de energia elétrica por fontes de biomassa

Devido à extensão territorial brasileira, diversidade agrícola, ecossistemas e condições climáticas favoráveis, o país tem disponibilidade de diferentes tipos de matéria-prima para geração e cogeração de energia utilizando biomassa (ARAÚJO, 2016). Como o Brasil dispõe de tantas particularidades positivas neste aspecto, se faz necessário o questionamento referente às questões ambientais destas atividades econômicas. Biomassa é qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. Sua origem, pode ser: florestal (madeira principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo). Os derivados obtidos dependem tanto da matéria-prima utilizada (cujo potencial energético varia de tipo para tipo) quanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos (ANEEL, 2008).

Uma das alternativas viáveis atualmente é a digestão anaeróbia destes resíduos, que permite a reciclagem e a geração de energia. A biodigestão, também chamada de biometanização ou digestão anaeróbia, é um processo com ampla aplicabilidade para

a conversão de resíduos e efluentes orgânicos em biogás, biometano e biofertilizante, associando o tratamento adequado à geração de energia renovável (RESENDE et al., 2015). Durante o processo da matéria orgânica dentro do biodigestor é obtido o biogás. Além das aplicações convencionais do biogás na geração de eletricidade, calor ou cogeração, também existe a possibilidade da injeção em gasodutos e o uso veicular do produto processado a partir da purificação do biogás (MME, 2016).

A digestão anaeróbica de material orgânico acontece por processo de fermentação onde acontece a degradação da mesma em composto mais simples facilitando o tratamento do efluente. Todo este processo acontece por meio de ação de grupos de micro-organismos, principalmente bactérias e arqueias que não necessitam de oxigênio para o seu desenvolvimento. Estes micro-organismos pertencem ao grupo dos anaeróbicos que interagem com o substrato simultaneamente até a formação dos produtos finais. O biogás obtido neste processo é constituído basicamente por Metano (CH_4), Dióxido de Carbono (CO_2), Água (H_2O), Hidrogênio (H_2), Amônia (NH_3), Nitrogênio (N_2), Oxigênio (O_2), Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) e outros gases traço (CIBIOGÁS, 2020). A composição do biogás pode variar bastante dependendo principalmente do tipo de matéria orgânica que está sendo usada como matéria-prima em operação no biodigestor. Na Tabela 2.2 estão descritos os principais elementos presentes no biogás juntamente com sua média percentual.

Tabela 2.2: *Composição do biogás*

COMPONENTE	CONCENTRAÇÃO
Metano (CH_4)	50-75 % Vol.
Dióxido de carbono (CO_2)	25-45 % Vol.
Água (H_2O)	2-7 % Vol. (20-40°C)
Sulfeto de hidrogénio (H_2S)	20-20.000 ppm
Nitrogênio (N_2)	< 2 % Vol.
Oxigênio (O_2)	< 2 % Vol.
Hidrogênio (H_2)	< 1 % Vol.

Fonte: (Elaborada pelo autor a partir de CIBIOGÁS (2020) e Rohstoffé (2010)).

A produção de biogás acontece naturalmente na decomposição de matéria orgânica. Somente no século XIX e início do século XX a humanidade começou a explorar esta fonte como forma de energia calorífica e iluminação. Os primeiros países a usarem este recurso foram a China e Índia utilizando resto de alimentos e dejetos como matéria-prima para produção de biogás (KARLSSON et al., 2014).

O aproveitamento energético do biogás é feito através das seguintes etapas: pré-tratamento do substrato; digestão anaeróbia no biodigestor; armazenamento, tratamento e valorização do digestato; tratamento, armazenamento e transporte de biogás; aplicação do biogás na geração de energia elétrica e/ou calor; e, produção, armazenamento e transporte de biometano. Na Figura 2.4 é possível observar o diagrama da cadeia produtiva do biogás.

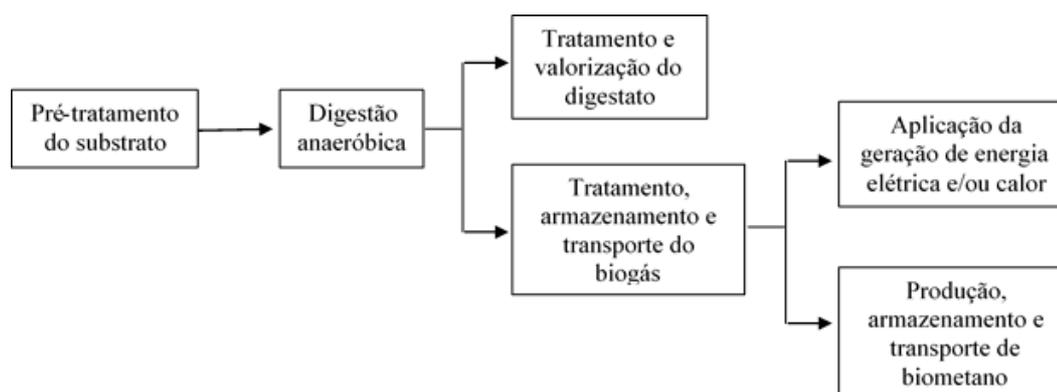


Figura 2.4: Cadeia produtiva do biogás

Fonte: (CIBIOGÁS, 2020).

O pré-tratamento do substrato está diretamente envolvido com a capacidade de produção de biogás. Está diretamente relacionada ao pré-tratamento a escolha do tipo de matéria-prima, transporte, acondicionamento do material e, o mais importante, o dimensionamento do mesmo com a sua quantificação. Outra característica importante é a classificação e remoção de materiais estranhos. Os mais comuns de serem encontrados em meio ao substrato são pedras e terra, na maioria dos casos são removidas do fundo do tanque de carga. Dependendo do tipo de substrato e o tamanho dos sistemas de produção, são utilizados separadores de materiais pesados. Outros materiais estranhos são separados manualmente na entrega do substrato ou durante o enchimento do equipamento de alimentação (ROHSTOFFE, 2010).

O processo de biodigestão concentra-se dentro dos biodigestores. Através do processo de digestão é que acontece a decomposição da matéria orgânica presente que se degrada com ausência de oxigênio. Este processo acontece em quatro estágios na seguinte sequência: a) Hidrólise, b) Acidogênese, c) Acetogênese e d) Metanogênese. Em áreas rurais o biodigestor mais usado é o de lagoa coberta. Estes biodigestores são lagos para depositar os resíduos orgânicos que irão passar pelos processos de biodigestão e a lona usada como cobertura irá realizar o armazenamento de biogás conforme mostrado na Figura 2.5 Este tipo de biodigestor tem maior capacidade de receber matéria-prima, cerca de 50% a 100% comparados com outros modelos convencionais. Uma outra grande vantagem que este modelo oferece é a sua maior eficiência quando usados em países

tropicais como o Brasil, tendo o benefício do aproveitamento do calor típico atmosférico para manutenção da temperatura (COELHO et al., 2018).



Figura 2.5: *Biodigestor modelo lagoa coberta.*

Fonte: (EMBRAPA 2018).

O aproveitamento do biogás tende a avançar no Brasil por possuir enorme disponibilidade de resíduos. A energia gerada pela decomposição de resíduos urbanos (em aterros sanitários ou esgoto doméstico) ou agropecuários (dejetos de suínos, bovinos e aves, por exemplo) dependendo da forma de gestão prévia destes resíduos, é uma alternativa que vem contribuindo para a sustentabilidade (SILVA et al., 2017).

Conforme os dados da Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes (ABIEC) o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro em 2020 teve um crescimento nominal de 6,8% em relação ao ano anterior. Um dos fatores que contribuíram para este crescimento foi o PIB da Pecuária nacional que no mesmo período registrou um crescimento de 8,3% para 8,5%. O total movimentado pela pecuária de corte em 2019 no Brasil foi de R\$ 618,50 bilhões, 3,5% acima dos R\$ 597,22 bilhões registrados em 2018. Estão inclusos neste quantitativo todos os custos gastos como insumos, investimento em genética, sanidade animal, nutrição, exportações e vendas no mercado interno (ABIEC 2020).

Para produzir esta grande quantidade de proteína animal a agropecuária nacional gera um quantitativo equivalente de dejetos. O país conta com um rebanho de aproximadamente 213.676.473 cabeças de bovinos e 41.443.594 cabeças de suínos (ABIEC, 2020; IBGE, 2019a). A bovinocultura é destaque no agronegócio brasileiro sendo proprietário do maior rebanho efetivo do mundo, liderando as exportações. É responsável por um

quinto da carne comercializada internacionalmente, vendendo para mais de 180 países. Possui dois seguimentos distintos: produção de carne e leite. Na suinocultura o Brasil está ranqueado no quarto lugar na produção e exportação mundial com 3,983 milhões de toneladas produzidas e 750 mil toneladas exportadas. Atualmente o país é responsável por 10% da exportação da carne suína no mundo. Os principais produtores estão alocados na Região Sul do país (ABIEC, 2020; EMBRAPA, 2001).

A utilização da biomassa na matriz elétrica brasileira como fonte de matéria-prima na produção de energia elétrica tem sido crescente. Principalmente em sistemas de cogeração, onde é possível obter energia térmica e elétrica, dos setores industrial e de serviços. Já ocupou a segunda posição na matriz da eletricidade nacional. Na relação das fontes internas, a biomassa só foi superada pela hidroeletricidade, com participação de 85,4% incluindo importação (ANEEL, 2008).

Analisando as tecnologias das fontes energéticas alternativas renováveis já suficientemente maduras para serem empregadas comercialmente, somente a biomassa, utilizada em processos modernos com elevada eficiência tecnológica, possui flexibilidade de superior energético, tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transporte (CORTEZ, 2008). A escolha do substrato de biomassa em questão neste trabalho está diretamente relacionada com as conformidades do princípio da biotecnologia adotando o fator quantitativo que justifique a viabilidade e atenda a demanda requerida (ROHSTOFFE, 2010).

2.3.1.1 Tecnologia para conversão de biogás

Segundo Garcilasso et al. (2010) é possível converter a energia química das moléculas de biogás em energia mecânica e, por sua vez, em energia elétrica através de processo de transformação em combustão controlada. Os métodos mais utilizados para este tipo de conversão são as utilizadas em turbinas e em motores de combustão interna, ambas a gás.

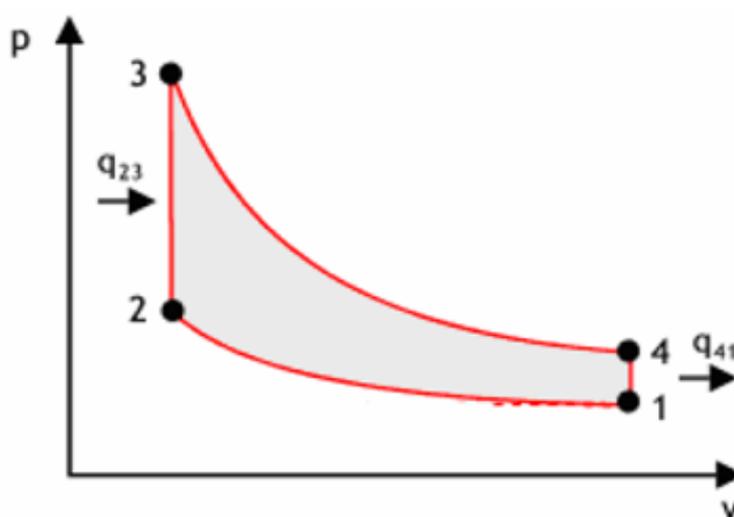
Neste trabalho serão considerados os motores de combustão interna, mais especificamente os motores de Ciclo Otto que se caracterizam por realizar queima interna da mistura de vapor e combustível dentro de um cilindro (CORRÊA et al., 2003). De acordo com Castro (2007) a mistura de vapor e combustível é aspirado para dentro do cilindro antes da compressão e após a compressão acontece o centelhamento através de uma vela de ignição que resulta na combustão interna da mistura. Esta combustão gera uma sequência de ações que ocorrerão em 4 tempos que caracterizam o funcionamento dos motores de Ciclo Otto. No Quadro 2.1 estão descritas as 4 etapas do motor.

Os motores de Ciclo Otto são representados pelo ciclo padrão do ar no qual é considerado um ciclo ideal. A Figura 2.6 demonstra o funcionamento do modelo de motores padrão ar Otto (BORGNAKKE; SONNTAG, 2018).

Quadro 2.1: *Etapas de funcionamento de motores Ciclo Otto*

TEMPO	DESCRIÇÃO
Primeiro	Abertura da válvula de admissão através da qual será injetada a mistura no cilindro vapor-combustível. Neste momento o pistão será empurrado para baixo gerando um movimento juntamente com o virabrequim.
Segundo	Válvulas de admissão serão fechadas e a compressão de mistura que é em média da ordem de 10:1 haverá a elevação do pistão. Enquanto o pistão sobe e antes da chegada do mesmo a parte superior a vela de ignição gera a fagulha do centelhamento.
Terceiro	Expansão dos gases quentes formados através de explosão controlada. Esta expansão gera a força que move o pistão para baixo.
Quarto	Os gases são removidos da câmara onde encontra-se o pistão e há a explosão através da abertura da válvulas de escape.

Fonte: (CASTRO [2007]).

**Figura 2.6:** *Ciclo padrão Otto.*

Fonte: (SOUZA; ASSOCIADO [2016]).

Este tipo de motor segue a seguinte sequência de processos:

1. Processo 1-2 = compressão isoentrópica do ar (1º Tempo);
2. Processo 2-3 = calor é transferido (q_{23}) durante a ignição do combustível (no momento que o pistão está no Ponto Morto Superior (PMS));
3. Processo 3-4 = expansão isoentrópica; e
4. Processo 4-1 = rejeição de calor (q_{41}).

A Figura 2.7 apresenta, em sequência, os processos dos quatro tempos (admissão, compressão, explosão e expulsão) do funcionamento de um motor a combustão interna do tipo ciclo Otto.

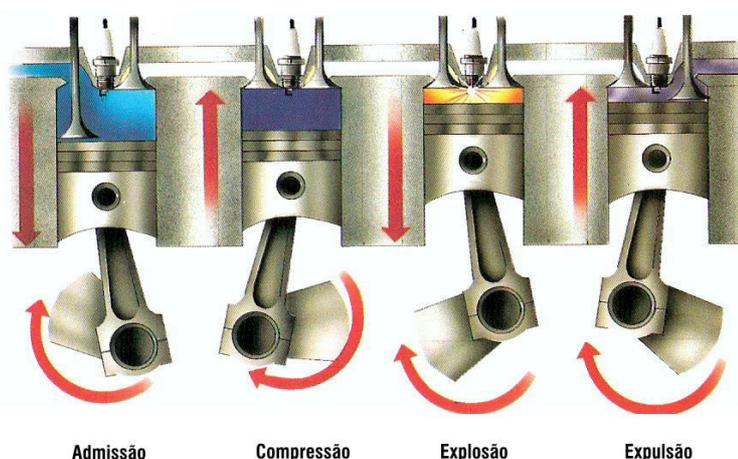


Figura 2.7: Quatro tempos do motor de Ciclo padrão Otto.

Fonte: (SOUZA; ASSOCIADO, 2016).

2.4 Produção de energia elétrica a partir de irradiação solar

Quase todas as fontes de energia – hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos – são formas indiretas de energia solar. A radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoeletrico e o fotovoltaico. A conversão direta da energia solar em energia elétrica ocorre pelos efeitos da radiação (calor e luz) sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. Destaca-se o fotovoltaico, que é quando os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica, por meio do uso de células solares (ANEEL, 2008).

Além das condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar etc.), a disponibilidade de radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano). É possível afirmar que há uma dependência do posicionamento da Terra em relação ao Sol em um determinado período do ano. Isso se deve à inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente (movimento de rotação) e à trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol (translação ou revolução) (REIS, 2011).

A disponibilidade e a variabilidade do recurso energético solar estão intrinsecamente associadas à duração do dia e à quantidade de energia solar incidente em um ponto qualquer da superfície terrestre apresentada de acordo a orientação espacial e período anual correspondente à variabilidade temporal característica de dois ciclos: o ciclo anual de tempo e clima da região. Estas condições provocam também alterações nos sistemas meteorológicos que, conseqüentemente, criam alterações na nebulosidade e nas concentrações dos gases, afetando os processos radiativos que atenuam a radiação solar ao longo de seu percurso na atmosfera (INPE, 2017).

Devido ao movimento de rotação e translação da Terra e, conseqüentemente, a estações do ano, a produção de energia elétrica provinda de sistemas fotovoltaicos sofre variações. Na Figura 2.8 são apresentadas as médias mensais dos totais diários de irradiação global para cada região do Brasil.

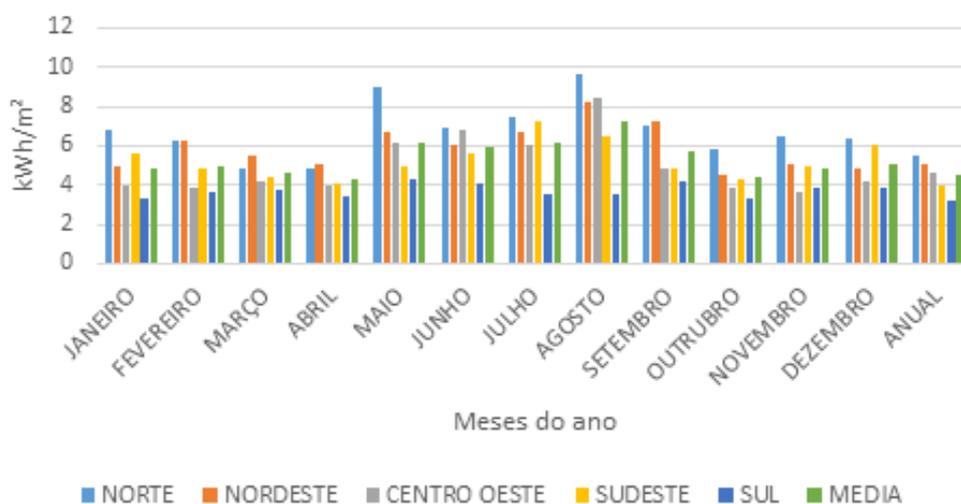


Figura 2.8: Média anual de irradiação no Brasil.

Fonte: (Elaborada pelo autor a partir dos dados do CRESESB (2018)).

Assim como ocorre com as demais fontes para a produção de energia elétrica no Brasil, a participação da energia solar é pouco expressiva mas vem ganhando espaço na matriz elétrica nacional, chegando em Outubro de 2020 a um percentual de 3,7% do total da matriz elétrica nacional instalada. Isto corresponde a mais de 50% da capacidade instalada da usina hidrelétrica de Itaipu, de 14 mil MW (MME, 2021).

O potencial de energia solar disponível no Brasil está quantificado acima da média em relação a outros países. A disponibilidade de radiação solar anual supera os $1.825 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Seria o mesmo que afirmar que, em cada metro quadrado de superfície tem-se uma média diária de 5 kWh de energia solar. Na Figura 2.9 é mostrada a média anual de irradiação no plano inclinado no Brasil. O recurso da radiação solar é aproveitado de diversas formas em todo o território, não somente por produção de energia elétrica através de células fotovoltaicas, mas principalmente através da fotossíntese realizada pelas plantas para produção de alimentos de origem vegetal, produção de madeira e biocombustíveis, conversão térmica para aquecer água, entre outros (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

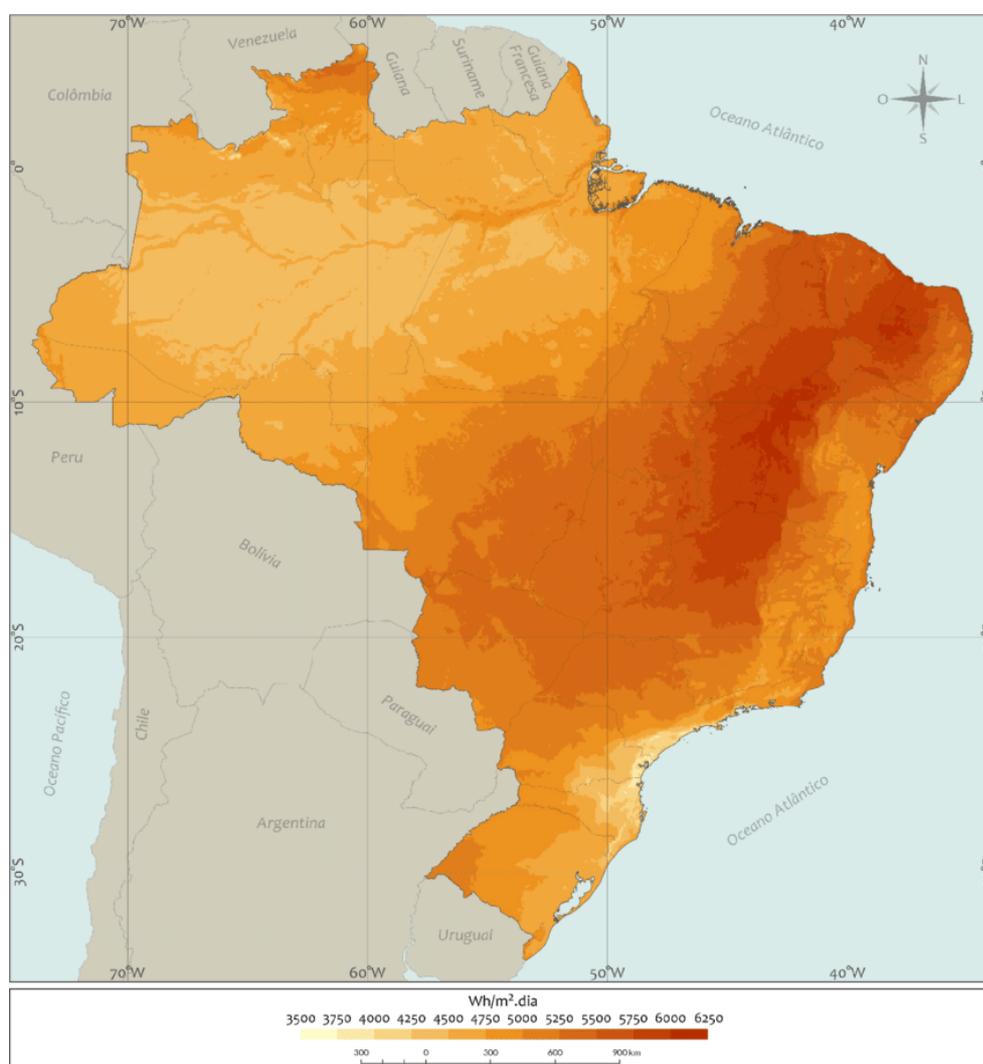


Figura 2.9: Média anual de irradiação no plano inclinado no Brasil.

Fonte: (INPE, 2017).

As Usinas Fotovoltaicas (UFV), com 1.686 MW, representam aproximadamente

Quadro 2.2: Principais equipamentos utilizados em SFV

EQUIPAMENTOS	DESCRIÇÃO
Módulos Fotovoltaicos	Formados por um conjunto de células fotovoltaicas, que podem variar conforme o modelo, que são interligadas eletricamente e encapsuladas. Tem o objetivo de capturar e transformar a radiação solar em energia elétrica. A maior parte dos módulos fotovoltaicos são divididos em dois tipos de substância usadas para sua fabricação, que são os de silício monocristalino e silício policristalino.
Inversor	Tem a função de inverter a energia gerada nos módulos fotovoltaicos, que são produzidas em Corrente Contínua (CC), para Corrente Alternada (CA). Faz também a função de medição e segurança do SFV.
Otimizador de potência	É um conversor de CC-CC conectado ao módulo fotovoltaico tornando o módulo independente e inteligente aumentando a produção. Também faz uma parte de segurança importante desligando os conjuntos de módulos, chamado de <i>Maximum Power Point Tracking</i> (MPPT) (conjunto de módulos fotovoltaicos que respeita o mínimo e máximo de potência em uma entrada do inversor), sempre que o inversor ou a rede elétrica estiverem desligados. Esta tecnologia é nova e para ser usada necessita que o inversor seja adequado para o mesmo.
Estrutura de fixação	Estrutura rígida para afixação dos módulos fotovoltaicos no telhado ou no solo. Estas estruturas são demandadas de acordo com o projeto e características específicas de cada um deles.
Cabeamento	Existem dois tipos de cabeamento usados em um SFV: os cabos CC que fazem a ligação dos módulos ao inversor e os cabos CA que fazem as ligações do inversor à rede receptora. Todo o dimensionamento de tamanho e bitola dos cabos irão depender diretamente do dimensionamento do projeto.
String Box	Este dispositivo é importante em casos de falhas na rede ou para reparação e manutenção dos equipamentos do SFV. Uma de suas funções é isolar os inversores dos módulos fotovoltaicos.
Disjuntores	São dispositivos usados para a proteção de todo o SFV contra surtos da rede, sobrecarga e outros. São usados principalmente para isolar o SFV da rede receptora.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de [Pinho e Galdino \(2014\)](#) e [SOLAREEDGE \(2020\)](#).

7% da capacidade instalada. Nos últimos 9 anos a participação das fotovoltaicas juntamente com os parques eólicos brasileiros aumentaram consideravelmente. Este panorama deverá manter-se para os próximos anos com a entrada de mais 66 empreendimentos. Interessante ressaltar que essa fonte, devido às características construtivas, apresenta um tempo médio de implantação inferior em relação aos outros demais investimento principalmente se comparado com as hidrelétricas (MME, 2021).

Um SFV é composto de um conjunto de equipamentos que são necessários para a absorção da irradiação solar e transformação da mesma em energia elétrica. Parte importante deste processo está na conversão, transmissão, distribuição, sistemas de proteção e conexões. Conforme Liu et al. (2014), um SFV pode estar em modelos *On-Grid*, que estão conectados à rede de distribuição da concessionária de energia elétrica local ou *Off-Grid*, que estão isolados. No Quadro 2.2 estão listados os principais equipamentos usados na instalação de um SFV de baixa tensão residencial.

Comumente, SFVs são instalados em estruturas já concebidas como telhados e paredes laterais de prédios, casas, indústrias e outros. Também podem ser instalados no solo utilizando áreas degradadas ou áreas não utilizadas para agricultura. Dependendo das condições poderá haver o consórcio de SFV com alguns tipos de agriculturas e pecuária. Este tipo de instalação é mais utilizado em projetos de usinas ou para consumidores de alta demanda e que dispõem de espaço para isto.

2.5 Resposta a demanda

Com o avanço das tecnologias e a diversificação das fontes produtoras de energia elétrica a partir de GD surgiu a necessidade de controlar e dar segurança para os sistemas de transmissão e distribuição das redes elétricas. O avanço desta diversificação aconteceu devido ao amadurecimento dos sistemas de produção e o avanço em pesquisa das fontes de GD. Um dos grandes avanços tecnológicos que permitiu este acontecimento foram as condições de intercomunicação de sistemas e dispositivos, sensoriamento de estruturas e o monitoramento mais eficiente e em tempo real. Ainda existe um longo caminho para este conceito devido ao impasse de integrar redes antigas com este atual modelo (BRASIL, 2019).

Estas novas tecnologias também são conhecidas como Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) ou *Distributed Energy Resources*, em inglês. Estas tecnologias são definidas como tecnologias de geração e/ou armazenamento de energia elétrica, que estão localizadas dentro da área de uma concessionária de distribuição, normalmente junto a unidades consumidoras, atrás do medidor. O objetivo principal é que as tecnologias inteligentes façam a transformação das redes convencionais em redes de alta interação entre dispositivos, mais maleável e adaptativa com a participação do consumidor (EPE

2018). Na Figura 2.10 está representado o modelo de transformação das redes elétricas atuais para as SGs, capazes de otimizar serviços e eficiência.

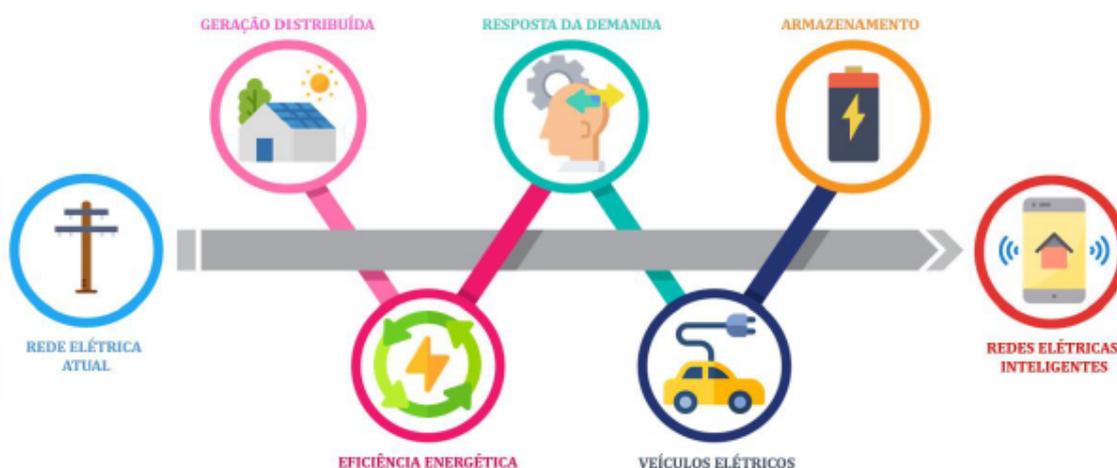


Figura 2.10: Transformação das redes elétricas convencionais em redes inteligentes.

Fonte: (EPE, 2018).

Um exemplo prático que irá auxiliar o sistema elétrico nacional a torna-se mais estável, seguro e atingir suas metas é a implementação de ações que consolidam a RD alterando o consumo para beneficiar todo o sistema elétrico. A RD trata-se de mecanismos que permitem alterar o consumo de energia do lado do consumidor em relação às condições ofertadas. É possível atingir este objetivo com a diminuição do consumo ou deslocando o consumo para fora do horário de ponta. Importante ressaltar que a RD está diretamente ligada a condições vitais do sistema elétrico auxiliando o equilíbrio em tempo real e diminuindo as variações bruscas de mudanças da oferta e demanda. Estes mecanismos também irão permitir que o consumidor gerencie melhor o uso da energia elétrica, respondendo às variações no preço e às condições da concessionária de eletricidade que opera o sistema mediante pagamentos (GELLINGS, 2020).

Outro grande desafio da RD é a inclusão destas tecnologias no sistema elétrico nacional. Estas tecnologias irão potencializar os benefícios de outros REDs em sua maior parte para consumidores residenciais dando maior confiabilidade e flexibilidade ao sistema. As SGs juntamente com a *Smart Metering* (medição inteligente) que é feita através de medidores inteligentes com leitura bidirecional com capacidade de transmitir dados em duas vias, uma para concessionária e a outra para próprio consumidor. Esta tecnologia irá transformar a RD tornando possível a comunicação direta entre a geração e o consumo elétrico permitindo tomadas de decisões mais precisas e eficientes. A medição inteligente permite medir de forma mais precisa o consumo, permitindo que os clientes juntamente com as concessionárias elétricas tomem decisões capazes de diminuir o custo com energia alterando o modelo contratual tarifário (BRASIL, 2019).

Com a introdução no mercado dos medidores inteligentes será possível obter resultados melhores. Por meio deste tipo de tecnologia o consumidor poderá compreender o seu perfil de uso tendo acesso ao valor do kWh que está sendo consumido no exato momento. Será possível adicionar na residência tecnologias como sensores e atuadores conectados diretamente aos medidores inteligentes que permitem controlar equipamentos (como ar-condicionado) e acompanhar o consumo em tempo real, criando o que é chamado de Smart Home (SH).

2.5.1 Escalonamento de consumo

O uso de sistemas computacionais para a simulações de estrutura físicas em ambiente virtual é muito utilizado para estudar e dimensionar de maneira correta uma estrutura elétrica (LÉVESQUE et al., 2012). Para elevar o grau de eficiência é possível utilizar plataformas para concentração e gerenciamento de dados. Com estes dados pode-se simular vários sistemas de transmissão e distribuição operacionais de forma inteligente, fornecendo avaliações mais abrangentes. Estas mesmas plataformas permitem que equipes desenvolvedoras elaborem estruturas mais precisas auxiliando o suporte a tomada de decisões nas áreas de preparação, planejamento, formulação dentr outros (XU et al., 2016). Tecnologias inteligentes podem possuir um valor estratégico significativo devido à sua flexibilidade inerente ao lidar com diferentes trajetórias de evolução do sistema (NASIRI et al., 2017).

É possível encontrar diversas bases de dados com uma quantidade expressiva de trabalhos que propõem algoritmos que calculam o fluxo de carga de transmissão e distribuição de redes elétricas (UDE et al., 2019; ALAHAKOON; YU, 2015; HASHMI et al., 2011). Estes algoritmos podem fornecer soluções em diversas áreas. Aplicações em otimização reduzem o tamanho dos problemas, minimiza efeitos negativos e diminuem o tempo e pessoal gasto para soluções e problemas gerais (ELTANTAWY; SALAMA, 2014). Calcular percentuais de eficiência, funcionalidade e posicionamento correto de sistemas elétricos é de grande importância antes e após à sua implementação (XU et al., 2016).

Outra questão importante ligada à otimização está diretamente relacionada à incorporação de controladores a um sistema de controle existente que forneça dados em tempo real, históricos e técnicas usadas para prever energia demandada. A partir destes dados integrados poderá ser tratada a modularidade das arquiteturas estruturais. Com estas condições integradoras é possível abranger um número maior de ferramentas e métodos para otimização de despacho e acondicionamentos a serem usados na estrutura (CHANDLER; HUGHES, 2013).

A implementação e o uso destas tecnologias para otimização irá elevar o índice de eficiência e economia das estruturas elétricas nos âmbitos de produção, distribuição e

consumo. Estas tecnologias apresentam desafios significativos além do desenvolvimento e aprimoramento das próprias tecnologias, incluindo a necessidade de integração de sistemas da produção de energia ao consumo, bem como as operações gerais do sistema de energia (WAKEFIELD, 2011).

Em relação ao escalonamento do consumo de energia, dentre as diversas estratégias que podem ser usadas para este fim, o *Problema do Bin Packing* (PBP) (JOHNSON, 1974) é uma metodologia para soluções de problemas que visa a organizar itens em pacotes, ou comumente referenciado o termo original em inglês, *bin* para minimizar o número geral de pacotes usados. O PBP é implementado e avaliado usando heurísticas de empacotamento de diversos itens encontrando a melhor condição para envio. Heurísticas são metodologias que propõem soluções para problemas baseadas em algumas ideias que podem ser adaptadas a qualquer condição algorítmica voltadas para a otimização (CARVALHO et al., 2020).

Existem diversas classes e modelos de algoritmos que são aplicados para solução deste problema, constituindo grupos de problemas para otimização combinatória que pertencem a uma classe mais geral denominada escalonamento (do inglês *scheduling*). Estes problemas vêm sendo intensamente explorados há várias décadas por diversos tipos de pesquisadores. Alguns pesquisadores teóricos exploram as condições estruturais simples do problema, permitindo, além da exploração de diversas propriedades do mesmo, a resolução como parte de problemas mais complexos (HAOUARI; SERAIRI, 2009).

É possível descrever o PBP da seguinte forma: dados n objetos ou itens $j(j = 1, \dots, n)$ com seus respectivos pesos α_j e n bins (ou pacotes) idênticos $i(i = 1, \dots, n)$ de capacidade finita c , determinar a alocação (ou designação) dos $j = 1, 2, \dots, n$ itens aos bins (sendo $\alpha_j \leq c, \forall j$), de maneira que seja utilizado o menor número de bins e que as restrições da capacidade do bins também sejam respeitadas. Ao iniciar-se a resolução do PBP todos os itens declarados juntamente com os seus pesos e condições serão conhecidos e declarados. A formulação matemática do PBP pode ser escrita de acordo com a Equação 2-1 (YAO, 1980):

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimizar} && \sum_{i=1}^n y_i \\
 &\text{sujeito a:} && \sum_{i=1}^n \alpha_j x_{ij} \leq C Y_i, && \text{para todo } i, \\
 &&& \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, && \text{para todo } j, \\
 &&& y_i \text{ e } x_{ij} = 1, \text{ binários,} && \text{para todo } i \text{ e } j
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

onde:

$y_i = 1$ se o bin i é utilizado e 0 caso contrário;

$x_{ij} = 1$ se o item j é alocado/designado ao *bin* i e 0 caso contrário.

A Equação 2-1 tida como objetivo, busca minimizar o número total de *bins* utilizados. As duas primeiras restrições asseguram que a capacidade de cada *bin* utilizado não seja violada e que cada objeto j seja alocado a exatamente um *bin*. Já a terceira restrição assegura a integralidade das variáveis de decisão.

Conforme descrito por Cunha et al. (2008), o PBP é de grande importância, sendo utilizado para otimização de serviços de entrega de acordo com a capacidade de transporte, dentre outras coisas. São muito aplicados no contexto logístico para distribuição de elementos computacionais tais como escalonamento de processos em processadores e tráfego de dados em redes lógicas (NIZ; RAJKUMAR, 2006), ou mesmo escalonamento de máquinas virtuais em plataformas de computação em nuvem (FATIMA et al., 2018). Como exemplo prático de uso pode ser citado o trâmite de uma determinada informação de um destino para outro (ou destinos próximos entre si), quando se busca otimizar o agrupamento de entregas dos pacotes de modo a reduzir a quantidade de pacotes necessários e, conseqüentemente, diminuir o tráfego de dados na rede.

Também é muito comum encontrar o PBP sendo utilizado para otimização de transportes tais como empresas que trabalham com transporte de carga e logística de materiais (BALDI et al., 2019). Em muitos casos as distâncias de deslocamento dos pontos, onde os veículos são carregados, até uma localidade ou região onde são realizadas as entregas é muito superior às distâncias dos percursos em rotas. Características da carga, tempos envolvidos podem acarretar um número de entregas não elevado para cada veículo. Normalmente são utilizados diversos veículos para uma determinada localidade com vizinhas a outras localidades, próximos entre si, de forma a realizar as entregas para todos os clientes ali localizados utilizando menor tempo e menor logística (MIURA, 2008).

O problema da programação do consumo de eletricidade, dado o potencial de geração de energia para cada hora, pode ser visto como uma variação do PBP. Esta é a estratégia adotada na pesquisa aqui apresentada, cuja descrição é iniciada no Capítulo 3. Uma alternativa utilizada para sua resolução é utilizar métodos heurísticos que possibilitam solucionar de forma aceitável em condições computacionais. Heurísticas são técnicas e estratégias algorítmicas aplicadas para resoluções de problemas específicos, em geral elas retornam em tempo computacional razoável uma solução boa e por isso são comumente usadas para problemas \mathcal{NP} -Difícil (KARP, 1972), uma classe de problemas para os quais, de acordo com a teoria da complexidade, não há solução polinomial conhecida.

Embora não haja estratégia que sempre encontre uma solução ótima em tempo polinomial, as heurísticas determinísticas são a alternativa mais viável para resolver o PBP (CHOWDHURY et al., 2015). Uma heurística determinística se caracteriza por produzir

o mesmo resultado para uma determinada entrada, por meio de um processo que segue sempre os mesmos passos (CORMEN et al., 2009). Heurísticas deste tipo geralmente são mais simples que heurísticas não-determinísticas que, por sua vez, podem não oferecer um tempo de execução polinomial devido à possibilidade de múltiplos caminhos de execução. No Quadro 2.3 estão descritas algumas heurísticas que serão usadas neste trabalho.

Quadro 2.3: Descrição das heurísticas utilizadas

HEURÍSTICA	DESCRIÇÃO
<i>First-Fit</i> (FF)	Coloca um novo item no primeiro <i>bin</i> que tem espaço para acomodá-lo.
<i>First Fit Decreasing</i> (FFD)	Os itens são classificados em ordem não crescente e, em seguida, os itens são processados como a heurística <i>First-Fit</i> . Na verdade, é a heurística <i>First-Fit</i> com os itens classificados de forma decrescente.
<i>Best Fit Decreasing</i> (BFD)	Como a FFD, a BFD também classifica os itens em ordem não crescente. Em seguida, ela escolhe um <i>bin</i> de modo que o espaço vazio mínimo seja deixado após o item ser embalado.
<i>Worst Fit Decreasing</i> (WFD)	Funciona exatamente da mesma forma que a BFD, exceto que, em vez de escolher um <i>bin</i> com espaço vazio mínimo, ela escolhe um <i>bin</i> com espaço vazio máximo a ser deixado após a alocação do item.
<i>Second Worst Fit Decreasing</i> (SWFD)	Igual à WFD, mas escolhe o <i>bin</i> com o segundo espaço vazio mínimo. É também conhecido como <i>Almost Worst Fit Decreasing</i> (AWFD).

Fonte: (Elaborado pelo autor.).

Deve-se destacar no uso do PBP que, na prática, não se admite que o objeto em questão possa ser fracionado em mais de um *bin*, de modo a facilitar a sua acomodação e o melhor aproveitamento das capacidades dos *bins*. Isso ocorre porque é indesejável ou imprevisível para o modelo receber o objeto partido, em mais de uma entrega, uma vez que isso dificulta e até impede sua utilização em termos de estruturas e respectivas quantidades em conformidade com o traçado. É importante lembrar ainda que a produção dos objetos e o dimensionamento dos *bins* apresentado em cada caso terá suas particularidades estruturais.

Na Figura 2.11 está apresentada a alocação de 10 pacotes de tamanhos variáveis em 05 *bins* previamente determinados de acordo com sua condições de alocação. O

objetivo é encontrar o número mínimo de *bins* que podem acomodar todos os itens (em termos de seus pesos ou tamanhos). Este caso é PBP clássico, mas há outras variantes do problema, dentre as quais podem ser citadas *three-dimensional bin packing* (MARTELLO et al., 2000), *parametric bin packing* (BOYAR; FAVRHOLDT, 2007), *bin covering* (CSIRIK, 1999), *open-end bin packing* (YANG; LEUNG, 2003), entre outras. Diversas heurísticas estão disponíveis para resolver o PBP, sendo este um problema da classe \mathcal{NP} -Difícil (OJEYINKA, 2015).

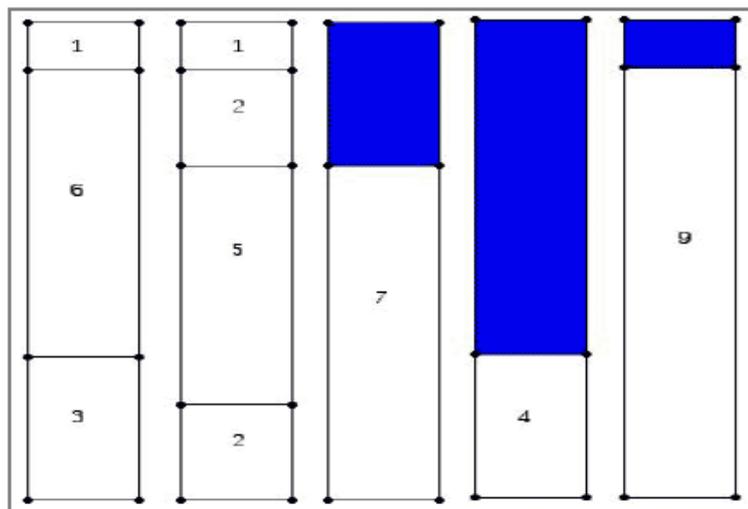


Figura 2.11: Exemplo de modelagem Bin Packing de pacotes.

Fonte: (OJEYINKA, 2015).

No problema tratado neste trabalho existem situações onde determinados equipamentos possuem dependência de funcionamento de outros equipamentos dentro da estrutura. Em virtude disso, é considerada também, além do PBP clássico, uma variante do problema, definida como *Problema do Bin Packing com Dependência* (PBPD). Conforme Capua (2017), o PBPD relacionam três problemas já discutidos na literatura: o Problema da Mochila 1-vizinho (*1-Neighbour Knapsack Problem*) (BORRADAILE et al., 2012), o Problema da Mochila Todos-vizinhos (*All-Neighbour Knapsack Problem*) (BORRADAILE et al., 2012) e o Problema de Realocação de Máquinas (*Machine Reassignment Problem*) (AFSAR et al., 2016). Além das questões pontais relacionado ao PBP clássico, nesta variante são tratados casos onde a correlação direta entre os itens precisam ser alocados no menor número de pacotes. A grande diferença no PBPD é que cada item poderá ter ou não associações com possíveis dependências. É proposto como solução exata para as questões de dependência a utilização de métodos *Branch and Bound* (LAWLER; WOOD, 1966) onde trabalha-se as questões de busca em profundidade.

O método *Branch and Bound* surgiu nos anos 50 como forma de gerar soluções para análise combinatórias. Por se tratar de um método enumerativo as soluções se dão por decomposição do problema principal. Isto ocorre com a construção estrutural em

forma de árvores onde cada ramificação são possíveis subproblemas derivados a partir do problema principal. Desta forma, o problema original permanece na raiz da árvore dando origem aos demais subproblemas para a decomposição. Na Figura 2.12 é apresentado o modelo de uma árvore neste sentido, onde P_0 é o problema principal e P_i , $i = (1, \dots, 8)$, são os subproblemas (TRIENEKENS, 1986).

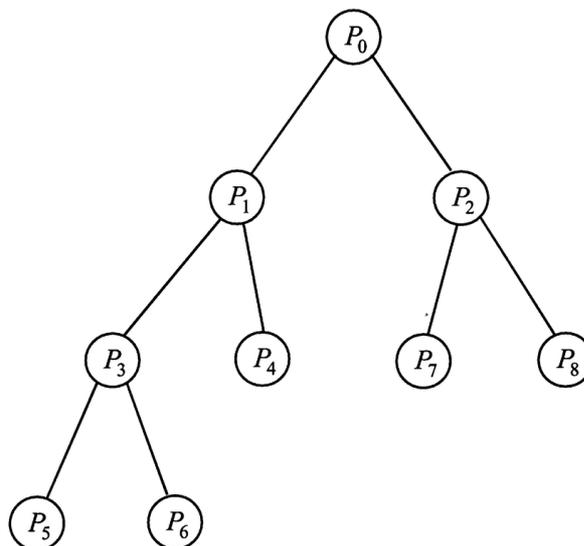


Figura 2.12: Estrutura de árvore Branch and Bound

Fonte: (Elaborada pelo autor).

Um subproblema associado a uma ramificação, que é determinado conforme uma regra de seleção pode ser resolvido diretamente ou decomposto em duas ou mais novas ramificações aos quais são adicionados à árvore. Para cada ramificação será computado o valor de limites superior ou inferior, que identifica a melhor solução que aquela ramificação pode gerar (LAI; SAHNI, 1984).

Capua (2017) propôs um método exato para resolver esta variante do *Bin Packing*, solução esta baseada em uma derivação da técnica de *Branch and Bound*, denominada por *Branch and Price* (BARNHART et al., 1998) que constitui a geração de variáveis em cada nó da árvore de busca, de maneira melhorada visando com que apenas uma fração das soluções factíveis seja examinada. Em sua proposta, cada busca é realizada por meio do algoritmo de Busca em Profundidade (*Depth First Search* (DFS)) (TARJAN, 1972).

O DFS tem como função visitar todos os nós da árvore e numerá-los conforme a ordem que são descobertos. O DFS não resolve o problema propriamente dito e sim cria um arcabouço para a solução eficiente para vários problemas ajudando a compreender o grafo analisado. O algoritmo começa num nó raiz e explora tanto quanto possível cada um dos seus ramos, antes de retroceder caso a busca não tenha sido completa (CORMEN et al., 2009).

3 MODELAGEM PROPOSTA PARA O CENÁRIO

Este capítulo tem como objetivo estabelecer os parâmetros metodológicos para a modelagem do consumo elétrico, potencial de produção de energia elétrica a partir biomassa e sistemas fotovoltaicos em modelos híbridos. Esta modelagem será utilizada como a base para a estratégia de otimização com o intuito de rearranjar o escalonamento de consumo fazendo o melhor aproveitamento dos recursos energéticos disponíveis.

3.1 Produção elétrica por biomassa

Este trabalho irá considerar exclusivamente os dejetos produzidos em suinocultura e bovinocultura de leite devido sua maior disponibilidade no cenário agropecuário nacional. Para a mensuração do quantitativo de dejetos é utilizado como referência as métricas estabelecidas pela [EMBRAPA \(2018\)](#). Sendo que a produção total dos efluentes depende de questões metabólicas dos animais em questão (fezes e urina) juntamente com a água utilizada para fazer a assepsia de currais e pocilgas. Contudo, é importante ressaltar que no processo de levantamento bibliográficos foram encontrados diversos métodos usados para o dimensionamento de resíduos e divergências consideráveis entre estes métodos [\(EMBRAPA, 2006\)](#).

Para suinocultura considera-se todo o dejetos produzido e canalizado. Para os dejetos produzidos na bovinocultura de leite considera-se somente o material captado através de raspagem do piso da área de espera dos animais para a ordenha e transportado para o biodigestor. O biodigestor tipo lagoa coberta foi o escolhido para este estudo devido sua fácil implementação e manejo.

3.1.1 Quantificação dos dejetos da suinocultura

Para efeito de subdivisão e dimensionamento da quantidade de dejetos produzidos por dia na suinocultura os animais serão classificados conforme o sistema de produção. De acordo com [EMBRAPA \(2018\)](#) os animais presentes na suinocultura são delimitados nas categorias apresentadas no Quadro [3.1](#).

De acordo com o Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás-ER) [\(CIBIOGÁS, 2009\)](#) o quantitativo esperado da produção de dejetos da suinocultura faz referência ao método estabelecido no *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) [\(DONG et al., 2006\)](#), adequando a referência internacional à realidade brasileira.

Quadro 3.1: Caracterização dos animais da suinocultura

CATEGORIA	CARACTERISTICAS
Maternidade (matriz fêmea + leitões)	As matrizes estão ligadas diretamente à produção de leitões e estes animais pesam em média 250 kg. Os leitões na maternidade iniciam o ciclo com o peso médio de 2 a 3 kg encerrando em média com 7 kg com aproximadamente 21 a 28 dias de permanência.
Leitão creche	Início do ciclo com média de 7 kg e encerram com aproximadamente 25 kg com um período de 35 a 42 dias.
Matriz gestação e Matriz macho	Não é possível delimitar certamente o período e características específicas destes animais, pois os mesmos irão pertencer ao plantel enquanto estiverem atendendo os interesses reprodutivos da propriedade.
Crescimentos e terminação	Também conhecida como fase de engorda. Tem início com média de 25 kg de peso por animal e é enviado para o abate quando atinge em média 120 kg.

Fonte: (ASAE, 2003).

Na metodologia utilizada pelo CIBiogás-ER são utilizados dados inerentes ao peso dos animais e o tempo de permanência anual dos suínos nas instalações. A Equação 3-1 é usada para calcular a quantidade de dejetos suíno diária.

$$PDDS = \sum_{i=1}^k (N_i \times PE_i) \times 1000 \quad (3-1)$$

onde:

$PDDS$ = produção diária de dejetos suínos ($m^3_{\text{dejetos}}/\text{dia}$);

k = número de categorias de suínos (número absoluto);

N_i = número de suínos pertencentes à categoria i (número absoluto);

PE_i = produção específica de dejetos por animal da categoria i de suíno (L/dia).

A produção específica de dejetos por animal (PE) é estimada seguindo as métricas propostas por EMBRAPA (2018), sendo adotados os valores apresentados na Tabela 3.1, de acordo com cada categoria considerada.

Tabela 3.1: *Produção de efluente de suinocultura*

CATEGORIA	PE
Maternidade (matriz fêmea + leitões)	27,0
Leitão creche	1,4
Matriz (fêmea)	16,0
Matriz (macho)	9,0
Crescimentos e terminação	7,0

Fonte: (EMBRAPA, 2018).

3.1.2 Quantificação dos dejetos da bovinocultura

A bovinocultura leiteira está diretamente ligada à criação de vacas para obtenção de leite através de ordenha manual ou mecânica. Animais utilizados para este fim podem estar em regime de confinamento, semiconfinamento ou livres a pasto dependendo de condições e características de cada propriedade ou necessidades de manejos. Independente do regime adotado, em algum momento estes animais estarão confinados por algumas horas no local da ordenha. Devido à necessidade deste manejo, é possível transportar os dejetos concentrados para sistemas de tratamento (COSTA; BATTAGLIA, 2014). As alimentações destinadas para estes animais estão associadas ao tipo de capim existente na pastagem disponível e normalmente complementada com alimentos volumosos, energéticos, proteicos, minerais, vitaminas e aditivos (EMBRAPA, 2001).

As vacas destinadas à produção leiteira permanecem na propriedade até atingirem todo seu ciclo de produção. Estes animais são separados quando bezerras a partir de 6 meses de vida e após dois anos e meio (ou quando atingirem o peso entre 270 a 350 kg, dependendo da raça do animal) devem ser inseminadas naturalmente ou artificialmente (EMBRAPA, 2018). O cálculo do índice de produção de dejetos por dia da bovinocultura de leite foi feito conforme a Equação 3-2.

$$PDDDB = \sum_{i=1}^z (N_i \times TC_i \times PE_i) \times 1000 \quad (3-2)$$

onde:

$PDDDB$ = produção diária de dejetos por bovino ($m^3_{\text{dejetos}}/\text{dia}$);

z = número de categoria de bovinos (número absoluto);

N_i = número de animais da categoria i de bovinos (número absoluto);

TC_i = horas de confinamento por dia para bovinos da categoria i (número absoluto);

PE_i = produção específica de dejetos por bovino da categoria i (L/dia).

A métrica citada é utilizada para quantificar a produção de dejetos produzidos por bovinos destinados a produção leiteira em confinamento. No período de levantamento bibliográfico não foram encontradas referências para quantificar a produção de dejetos gerados por bovinos em regime de semiconfinamento. Em virtude disto, foi considerado a quantidade total de dejetos disponíveis durante um determinado período de tempo em que os bovinos ficam confinados na área de espera da ordenha. Contudo é necessário um estudo mais aprofundado que permita identificar possíveis aspectos de sazonalidade no total de dejetos gerados nestes períodos. Mesmo com as considerações descritas acima e pela ausência de estudos específicos para a produção de dejetos na bovinocultura leiteira em semiconfinamento foi adotada a referência relacionada ao gado leiteiro confinado com a geração de 57,68 $L_{\text{dejetos}}/\text{dia}$ para cada animal (EMBRAPA, 2018).

3.1.3 Produção de biogás

A metodologia utilizada neste trabalho para a quantificação da produção de biogás utiliza a proposta estabelecida pela IPCC (DONG et al., 2006) que estima a produção teórica do metano. É considerado também um método mais complexo que necessita de informações mais detalhadas referente às práticas de manejo de dejetos e às características dos animais. A metodologia utiliza a valoração dos Sólidos Voláteis (SV) que é a porção dos sólidos que é perdida após a ignição ou calcinação da amostra a 550-600 °C, durante uma hora para sólidos totais ou 15 minutos para sólidos em suspensão voláteis, em forno mufla. O biogás é composto por diferentes tipos de gases, no entanto o gás mais relevante para o estudo é o metano (CH_4), pois corresponde de 60 a 70% do volume total, conforme descrito pela EMBRAPA (2018). Contudo, neste trabalho é considerado o fator de 60% de CH_4 presente no biogás assumindo uma perspectiva mais pessimista para produção. De acordo com a metodologia proposta, a emissão de metano por animal é estimada de acordo com seu tipo (bovino ou suíno, no cenário tratado). Dessa forma, esta variável pode ser estimada usando a Equação 3-3

$$FEM_j = SV_j \times \beta_{0j} \times 0,67 \times \frac{FCM}{100} \times SM, \text{ para } j = 1, \dots, t \quad (3-3)$$

onde:

FEM_j = fator de emissão de metano por animal do tipo j (Kg_{CH_4});

SV_j = sólidos voláteis por animal do tipo j (Kg_{SV});

β_{0j} = capacidade de produção de metano pelo dejetos para animais do tipo j (m^3_{SV}/Kg_{SV});

0,67 = conversão de m^3 de metano para kg de metano (número absoluto);

FCM = fator de conversão de acordo com o manejo (valor absoluto a cada 100 animais);

SM = fator do sistema de gerenciamento dos resíduos (número absoluto);

t = número de tipos de animais (no cenário considerado $t=2$, sendo suíno e bovino).

Com base no resultado obtido pela Equação 3-3 é possível estimar o volume total de emissão de metano através da Equação 3-4.

$$\Delta = \sum_{i=1}^t \frac{FEM_j \times N_j}{10^6} \quad (3-4)$$

onde:

Δ = emissão de metano durante o manejo de dejetos (Gg_{CH_4});

FEM_j = fator de emissão de metano por animal do tipo j (Kg_{CH_4});

N_j = número de animais do tipo j (número absoluto);

t = número de tipos de animais.

A Equação 3-5 descreve a estratégia usada para quantificar a produção diária de biogás. Esta metodologia foi desenvolvida pelo CIBiogás-ER (CIBIOGÁS, 2009) com base nos parâmetros descritos no IPCC (DONG et al., 2006).

$$PDB = \sum_{i=1}^x \left(N_i \left(\frac{PM_i}{PP_i} \right) \times FDC_i \times SV_i \times \left(\frac{FCM \times \beta_{0i} \times F_b}{CH_4} \right) \right) \quad (3-5)$$

onde:

PDB = produção diária de biogás (m^3);

N_i = número de animais da categoria i (número absoluto);

PM_i = peso médio para animais da categoria i (Kg);

PP_i = peso padrão para animais da categoria i (Kg);

FDC_i = fração diária de confinamento para animais da categoria i (entre 0 e 1) (número absoluto);

SV_i = sólidos voláteis referente ao tipo de animal da categoria i ($Kg_{SV}/animal$);

FCM = fator de conversão de metano de acordo ao manejo para a linha de base do sistema, considerando o tipo de animal da categoria i (lagoa aberta) (número absoluto);

β_{0i} = capacidade de produção de metano pelo dejetos referente ao tipo de animal da categoria i (m^3_{SV}/Kg_{SV});

F_b = fator de correção de incertezas (número absoluto);

CH_4 = Percentual de metano no biogás, para este trabalho é de 60%;

x = número de categorias (k para suínos e z para bovinos) (número absoluto).

Na Tabela 3.2 estão descritos os valores para a determinação dos coeficientes de $SV(g^{SV}/L)$ e $\beta_0(m^3_{CH_4}/Kg_{SV})$ utilizados para quantificar na transformação química de dejetos em biogás.

Tabela 3.2: Estimativa para a produção de efluentes conforme metodologia proposta

TIPO	$SV(g^{SV}/L)$	$\beta_0(m^3_{CH_4}/Kg_{SV})$
Suinocultura	35,38	0,38
Bovinocultura leiteira	54,54	0,15

Fonte: EMBRAPA (2018).

3.1.4 Aspectos técnicos de biodigestores lagoa coberta

Os Biodigestores de Lagoa Coberta (BLC) usualmente são mais recomendados e mais utilizados para o fim de tratamento de dejetos de animais que possuem Carga Orgânica Volumétrica (COV), em média 0,3 a 0,5 $Kg_{SV}/m^3_{RATOR}/dia$. A produção média de biogás por volume deste tipo de reator está entre 0,03 e 0,15 $m^3/m^3_{RATOR}/dia$, dependendo diretamente do tipo de substrato usado, COV e Tempo de Retenção Hidráulica (TRH). O BLC é um tanque escavado no solo, composto por material impermeabilizante que irá impedir o contato direto do substrato com o terreno e sua cobertura é flexível para que possa fazer o acúmulo do gás produzido. Possui pouca tecnologia, fácil implementação e manejo. Outra condição que motiva o uso deste modelo é o seu elevado TRH, que é uma característica importante para o auxílio da digestão deste tipo de matéria-prima. Para fazer o dimensionamento volumétrico de um BLC basta fazer a soma das Equações 3-2 e 3-1 apresentadas anteriormente.

Na Equação 3-6 é possível dimensionar a carga orgânica volumétrica do biodigestor, calculada conforme o quantitativo de matéria orgânica esperada.

$$V = \frac{Q \times S_0}{COV} \quad (3-6)$$

onde:

V = volume do biodigestor (m^3);

Q = vazão do substrato (m^3/dia);

S_0 = concentração de sólido volátil no substrato (Kg_{SV}/m^3);

COV = carga orgânica volumétrica ($Kg_{SV}/m^3/dia$).

Com a Equação 3-7 é possível calcular o tempo que o substrato irá permanecer dentro do biodigestor para que possa passar pelo processo anaeróbico e atingir o ponto desejado de decomposição da matéria orgânica.

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (3-7)$$

onde:

TRH = tempo de retenção hidráulica (dia);

V = volume do biodigestor (m^3);

Q = vazão substrato (m^3 /dia);

Os modelos de BLC possuem alguns aspectos técnicos que necessitam ser respeitados para que haja um melhor aproveitamento do material digestato e menor custo técnico operacional. Algumas métricas e ações de manejo irão evitar o assoreamento do BLC. Contudo, por simplicidade, estes aspectos foram ignorados na modelagem.

3.1.5 Aspectos técnicos da conversão do biogás em energia elétrica

Para a conversão do biogás é assumido o uso de motores de Ciclo Otto. Dessa forma, a Equação 3-8 é usada para estimar o rendimento total possível deste tipo de motor utilizando biogás como combustível. O rendimento total de um motor de combustão interna varia de 20 a 30% (BEM, 2008).

$$\eta_{\tau} = \frac{3600}{C_s \times PCI} \quad (3-8)$$

onde:

η_{τ} = rendimento total;

C_s = consumo específico (g/kWh);

PCI = poder calorífico inferior do combustível (MJ/Kg).

Para levantamento total da produção de energia elétrica é necessário avaliar a potência efetiva do motor que é a potência efetiva em seu eixo. A Equação 3-9 calcula este valor.

$$N_e = T \times \omega \quad (3-9)$$

onde:

N_e = potência efetiva (W);

T = torque (N/m);

ω = velocidade angular (rad/s).

A geração da energia elétrica propriamente dita acontece dentro do gerador elétrico que é uma parte acoplada ao motor no conjunto gerador. Os geradores ou alternadores, dependendo da necessidade da localidade, mais especificamente do tipo de ligação que é demandada, podem gerar tensões variadas. As mais comuns são 220/127

Volts (V), 380/220 V ou 440/254 V. A Equação 3-10 especifica o cálculo da potência do gerador (NISKIER; MACINTYRE, 2013).

$$P_{\alpha} = \frac{\sqrt{3V_t I}}{1000} \quad (3-10)$$

onde:

P_{α} = potência do gerador (kVA);

V_t = tensão (V);

I = corrente elétrica (A);

Todo gerador possui um fator de potência onde existe uma relação entre uma potência ativa (P) que usa como métrica o kW juntamente com a potência do gerador. Além disso, não apresenta um rendimento constante, variando com a carga, atingindo o valor máximo da carga entre 80 a 100% de sua potência máxima. Na Equação 3-11 está disposta a relação do rendimento de um gerador elétrico, a potência elétrica produzida em kW e a potência mecânica absorvida no eixo do motor.

$$\eta_g = \frac{P}{P_m} \quad (3-11)$$

onde:

η_g = rendimento do gerador elétrico (kW);

P = potência elétrica produzida (kW);

P_m = potência absorvida pelo gerador no eixo do motor (kW).

3.2 Sistemas fotovoltaicos

A produção de energia elétrica em um SFV requer estudos e análises de pontos importantes. Conforme exposto por Pinho e Galdino (2014) a projeção de um SFV envolve uma série de pontos importantes a serem avaliados como: mensuração da quantidade de radiação solar disponível na localidade que será instalado o SFV, inclinação e orientação dos módulos fotovoltaicos, demanda pretendida, análise financeira, estética e se o SFV será ou não conectado à outras redes.

Quanto à geração de energia elétrica em SFV, ela depende da radiação solar que adentra a atmosfera terrestre e passa a sofrer variações devido aos efeitos atmosféricos referentes à distância do Sol e a Terra e às condições da própria atmosfera terrestre. Estas variações são causadas principalmente por duas condições, a saber: *i*) espalhamento causados pela presença dos gases existentes na atmosfera e as partículas suspensa, chamado aerossóis, *ii*) e por absorção do ozônio (O_3), água (H_2O) e o dióxido de carbono (CO_2). O quantitativo de radiação solar que sofre este efeito de espalhamento é chamado

de radiação difusa e o restante que consegue chegar à superfície sem perturbação e é chamado de radiação direta.

A ciência considera dois tipos de radiação solar que incidem na atmosfera terrestre, a irradiância que incide em uma superfície horizontal é chamada de irradiância global no plano horizontal (G) compostas pela irradiância direta (G_b) e difusa (G_d), de acordo a Equação 3-12. A irradiância em uma superfície inclinada em qualquer direção recebe uma outra condição que é a reflexão causada pela vegetação, terrenos, construções, entre outras superfícies que podem provocar alguma alteração. Esta outra condição é chamada de radiação de albedo ou radiação refletida do terreno, expressa na Equação 3-13 (MARTINS et al., 2017).

$$G = G_b + G_d \quad (3-12)$$

onde:

G = irradiância global no plano horizontal;

G_b = irradiância direta;

G_d = irradiância difusa.

$$G_{\beta\gamma} = G_{b\beta\gamma} + G_s + G_\gamma \quad (3-13)$$

onde:

$G_{\beta\gamma}$ = irradiância global incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção (W/m^2);

$G_{b\beta\gamma}$ = irradiância direta incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção (W/m^2);

G_s = irradiância difusa incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção (W/m^2);

G_γ = irradiância de albedo incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção (W/m^2);

Seguindo este mesmo processo é possível calcular, em uma superfície inclinada, a irradiação global, horária, incidente, dada pela Equação 3-14

$$I_{\beta\gamma} = I_{b\beta\gamma} + I_s + I_\gamma \quad (3-14)$$

onde:

$I_{\beta\gamma}$ = irradiação global, horária, incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção ($kJ/m^2/h$);

$I_{b\beta\gamma}$ = irradiação direta, horária, incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção ($kJ/m^2/h$);

I_s = irradiação difusa, horária, incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção ($kJ/m^2/h$);

I_γ = irradiação de albedo, horária, incidente no plano inclinado e orientado em qualquer direção ($kJ/m^2/h$).

Um dos fatores de grande importância para determinar a quantidade de energia produzida por um SFV é estimar a quantidade de Horas de Sol Plena (HSP) que os módulos estarão expostos à radiação solar. A estimativa de HSP é o intervalo de tempo, em horas ao longo do dia, que uma hipotética irradiação solar permanece constante em 1.000 W/m^2 considerando que o total energético ao longo do dia seja equivalente à disponibilizada pelo Sol naquele determinado local (PINHO; GALDINO, 2014). Conforme a Equação 3-15 é possível mensurar este valor.

$$HSP = \frac{R_{sc}}{1 [kW/m^2]} \quad (3-15)$$

onde:

R_{sc} = radiação solar diária (kW/m^2).

Conforme afirma Villalva e Gazoli (2012), para determinar a potência nominal de um SFV projetado é necessário determinar o número de módulos fotovoltaicos que estarão em uso. Para isto, será necessário considerar o potencial nominal do SFV em Watts Pico (Wp), juntamente com o potencial de cada módulo. É possível calcular o potencial em Wp utilizando a Equação 3-16. É importante salientar que a taxa de desempenho é a indicação para medir a eficiência de um SFV que será estimada entre a relação do desempenho real e o desempenho máximo teórico.

$$P_{FV} = \frac{\left(\frac{E}{TD}\right)}{HSP_{MA}} \quad (3-16)$$

onde:

P_{FV} = é a potência de pico do módulo fotovoltaico (Wp);

E = consumo diário médio anual da edificação (Wh/dia);

HSP_{MA} = média diária anual das Hora de Sol Pleno (HSP) incidentes no plano do módulo fotovoltaico;

TD = taxa de desempenho (número absoluto).

Os módulos fotovoltaicos também podem sofrer variações no seu desempenho dependendo de variações na sua temperatura e sombreamento sobre eles. Na Figura 3.1 é apresentada a influência causada com irradiação em um módulo fotovoltaico mantido a 25° C . É possível observar que a corrente elétrica aumenta linearmente conforme o

aumento da irradiância incidente, enquanto é mantida a tensão caso a temperatura seja mantida (PINHO; GALDINO, 2014).

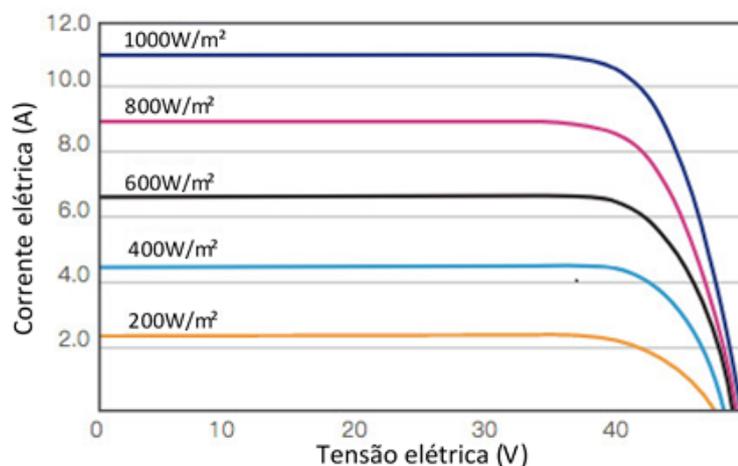


Figura 3.1: Influência da variação de irradiância na temperatura de 25° C.

Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014).

Os inversores são equipamentos que devem ser escolhidos de forma a atender as necessidades técnicas do SFV não operando em potência abaixo da nominal e em sobrecarga. Em sistemas que estão em modelos *Off-Grid* desconectados da rede da concessionária o dimensionamento do mesmo poder ser igual à potência do gerador fotovoltaico, mas para sistema *On-Grid* recomenda-se um dimensionamento igual ou superior à potência nominal do gerador.

É possível estabelecer uma potência nominal CA e a potência de pico do gerador. A Equação 3-17 apresenta a relação entre a potência que resulta no Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI). Os valores de FDI devem estar entre 0,75 e 0,85, dependendo do descrito no manual do fabricante. O limite superior estipulado é de 1,05 mas existem inversores modernos no mercado que podem trabalhar com até 120% da sua capacidade.

$$FDI = \frac{P_{Nca}}{P_{FV}} \quad (3-17)$$

onde:

P_{Nca} = potência nominal em corrente alternada do inverso (W);

P_{FV} = potência de pico do painel fotovoltaico (Wp).

Outro aspecto importante para fazer o dimensionamento dos inversores no Brasil é a observação dos parâmetros estabelecidos no Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2016). Estes parâmetros

dizem respeito a SFV em modelos *On-Grid* onde são especificadas as principais características dos níveis de tensão que devem ser respeitados.

3.3 Consumo elétrico

Na fase de projetos e dimensionamento dos sistemas para produção de energia elétrica com uso de biogás em Grupo de Moto Gerador (GMG) e SFV foram utilizados os seguintes recursos para auxílio da pesquisa: *i*) planilhas, com a lista dos equipamentos e suas respectivas potências elétricas, tempo de funcionamento de cada equipamento e dias de utilização por semana, dispondo as informações de uma média diária de consumo de energia elétrica (kWh/dia); *ii*) fatura de consumo fornecido pela concessionária local de energia elétrica; e *iii*) levantamento da curva de carga do consumo o mais aproximada possível das necessidades de funcionamento.

Para realizar os levantamentos necessários para a criação e adequação do modelo computacional sugerido, foi estabelecido que o levantamento da energia em potencial disponíveis serão definidas e mensuradas em horas. É definido também que o período que abrange o estudo considera um ciclo semanal de consumo de energia elétrica, este período corresponde a um ciclo completo de uso do parque elétrico que é utilizado como estudo. É esperado que neste período a maioria das necessidades elétricas primárias da área de estudo sejam utilizadas ficando apenas os casos esporádicos do uso de outros equipamentos ou eventualidades que não foram considerados neste trabalho.

Com base nestas suposições, o problema tratado neste trabalho consiste em escalonar a utilização de um conjunto de equipamentos levando em consideração o consumo estimado de energia para cada equipamento, assim como o período de tempo de consumo. Tendo como base modelagens previamente propostas (RUZBAHANI et al., 2019; TANG et al., 2013; CARON; KESIDIS, 2010), o conjunto de equipamentos é denotado por $E = \{e_1, \dots, e_n\}$, onde n é a quantidade de equipamentos. Por simplicidade é assumido que os equipamentos possuem uso ininterrupto, ou seja, uma vez iniciado não é interrompido e reinicializado até a conclusão da tarefa.

Os equipamentos são categorizadas em dois tipos:

- Cargas Fixas (CF): cujo período de uso não podem ser modificados. Supõem-se que o algoritmo de solução não tenha nenhum controle sobre essas cargas.
- Cargas Deslocáveis (CD): cujo consumo de energia pode ser deslocado para uma fonte ou intervalo de tempo diferente para beneficiar de períodos de maior geração por fontes próprias.

Embora a modelagem proposta use períodos representados por horas como a unidade de alocação, é improvável que o equipamento opere por períodos equivalentes

a horas exatas. Dessa forma, é considerado um conjunto de elementos $H = \{0, \dots, 23\}$, sendo os períodos de tempo em que o equipamento pode ser alocado para operação. Cada $t_i \in T, 0 \leq i \leq 23$ equivale a uma hora e possui 60 unidades de tempo disponíveis para agendamento, iguais a minutos, que variam de: $i:00$ a $i:59$.

Como pressuposto, a demanda de energia é previamente conhecida. Assim, cada equipamento $e_j, 1 \leq j \leq n$ tem um perfil de demanda d_j de eletricidade representado por uma tupla $d_j = (\omega_j, T_j, hm_{inicial_j}, hm_{final_j})$, onde ω_j representa a potência nominal do equipamento em W (extraído da placa ou manual do fabricante); T_j é a duração da utilização do equipamento, medida em minutos (a atribuição é feita considerando como máximo o consumo de um dia inteiro, sendo $1 \leq T \leq 1,440$ (24×60)); $hm_{inicial_j} = \{x \mid 0:00 \leq x \leq 23:59\}$ é um conjunto de tempo mínimo em que o uso do equipamento deve ser iniciado, enquanto $hm_{final_j} = \{x \mid 0:00 \leq x \leq 23:59\}$ é um conjunto de tempos máximos em que o uso deve ser encerrado. Por definição $hm_{inicial} = |hm_{final}|$, ou seja, os conjuntos são equipotentes com uma função injetora f com o domínio $hm_{inicial}$ e o contra domínio hm_{final} . Por exemplo, com $hm_{inicial_j} = \{05:00, 09:30\}$ e $hm_{final_j} = \{14:00, 17:30\}$, $f(05:00) = 14:00$ e $f(09:30) = 17:30$ o que significa que o uso do equipamento e_j deve iniciar a partir das 05:00, terminar às 14:00, reiniciar a partir das 09:30 e terminar às 17:30. Como restrições, $\forall x \in hm_{inicial_j} \rightarrow x \leq f(x)T_j$ e, se e_j tem carga deslocável então $hm_{inicial_j} = \{00:00\}, hm_{final_j} = \{23:59\}$. A partir destes dados é possível calcular o consumo de energia elétrica (c_j , em kWh) em uma determinada hora, para um equipamento j conforme a Equação 3-18

$$c_j = \frac{\omega_j \times \max\left(\frac{T_j}{60}, 1\right)}{1000} \quad (3-18)$$

onde

c_j = consumo de energia elétrica do equipamento j (kWh);

ω_j = potência nominal do equipamento (W);

T_j = tempo de duração de sua utilização (minutos).

Conceitualmente, o objetivo consiste em minimizar uma função objetivo que mede o custo total de uso dos equipamentos (representado pelo gasto com energia elétrica da concessionária), sujeito às restrições operacionais dos equipamentos e capacidade de geração. Assumindo que as fontes de energia renováveis podem fornecer uma energia de λ_h em uma determinada hora, a solicitação de energia do usuário à concessionária é dada por $\min(0, \Lambda_h - \lambda_h)$. Semelhante à maioria dos trabalhos anteriores relacionados, é assumido que a concessionária disponibiliza as informações de preço do kWh. Com base

nisso, o custo total é dado pela Equação [3-19](#),

$$\sum_{h \in H} \min(0, \Lambda_h - \lambda_h) \times P_h \quad (3-19)$$

onde

Λ_h = consumo total nesta hora (kW);

λ_h = energia de fontes renováveis disponível em determina hora (kW);

P_h = preço da eletricidade contratada no momento do consumo (R\$).

3.3.1 Programação do consumo de eletricidade como um problema de *Bin Packing*

A resolução do problema usando PBP consiste em atribuir os equipamentos a um período de tempo, ou seja, decidir em que horário ocorrerá o consumo de energia. O horizonte de planejamento é feito por horas (= *bins*). O objetivo é atribuir equipamentos em horas. Idealmente, o consumo de eletricidade do equipamento (= tamanho do item) deve ser menor ou igual ao potencial de geração de energia da hora (= capacidade do *bins*) para a qual foi programado. Isso deve ser feito para evitar o uso de energia da concessionária. Um exemplo é dado pela Figura [3.2](#), onde é considerada a atribuição dos equipamentos às horas.

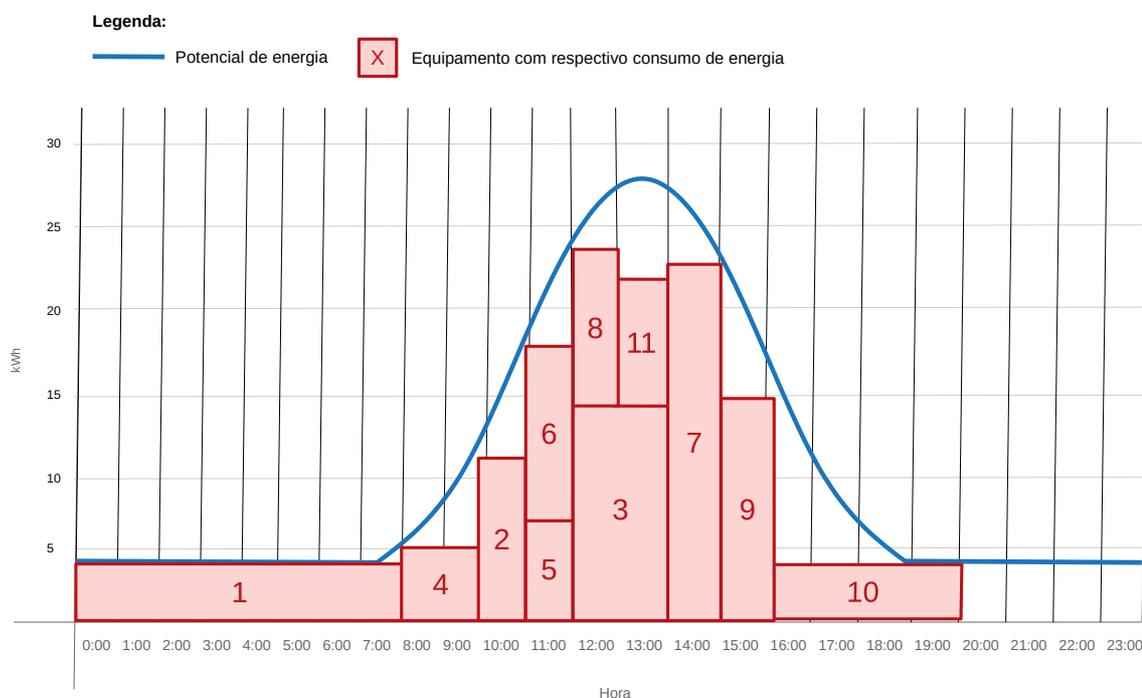


Figura 3.2: Representação do problema de escalonamento de equipamentos como *Bin Packing*.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

A modelagem proposta difere do PBP clássico porque, como o número de horas é fixo, a redução do número de *bins* não é considerada um objetivo. Outra diferença está relacionada à restrição de distribuição de um item cujo tamanho é maior do que a capacidade dos *bins*. No cenário modelado essa restrição não existe, embora deva ser evitada por representar o consumo da concessionária. Mesmo com essas adequações, soluções já consolidadas na literatura podem ser utilizadas para solucionar o problema proposto. O Quadro 3.2 resume a modelagem do problema de escalonamento de equipamentos como o PBP.

Quadro 3.2: Analogias entre Bin Packing e problema de escalonamento de equipamentos.

	Problema <i>Bin Packing</i>	Problema de escalonamento de equipamentos
Dados	Item <i>Bin</i> Tamanho do item Capacidade do <i>bin</i>	Equipamento Hora Consumo elétrico do equipamento Potência de geração da hora
Problema	Atribuir itens a um <i>bin</i>	Atribuir equipamentos a uma ou mais horas
Limitações	Capacidade do <i>bin</i>	O equipamento deve ser usado em intervalos de tempo contínuos, sem interrupção
Objetivo	Minimizar o número de <i>bins</i> usados	Minimizar o uso acima da geração disponível

Fonte: (Elaborado pelo autor).

4 ESTRATÉGIA PARA ESCALONAMENTO DE CONSUMO

A partir da modelagem proposta no capítulo anterior, neste capítulo é apresentada uma estratégia de melhoria de escalonamento de consumo de energia elétrica. Esta solução foi elaborada a partir do uso do *Bin Packing*, com a adaptação das principais heurísticas existentes para o problema, visando investigar a melhor alternativa a ser utilizada.

Inicialmente é apresentado o cenário que foi utilizado como estudo de caso visando demonstrar e avaliar a estratégia desenvolvida.

4.1 Propriedade usada como estudo de caso

Inicialmente, é de grande importância ressaltar que o estudo de caso foi usado principalmente para fornecer os insumos para a definição da modelagem e consequente elaboração da estratégia, devido a disponibilidade das condições necessárias para este trabalho. Contudo, o mesmo estudo poderá ser aplicado a qualquer outro caso que tenha condições similares onde disponha de mais de uma fonte produtora de energia elétrica que possa trabalhar em conjunto. Dessa forma, as contribuições apresentadas aqui podem ser utilizados e replicados para outros casos, bastando somente fazer o levantamento do potencial energético disponível, assim como os dados relativos ao consumo.

A propriedade rural escolhida para ser usada como estudo de caso fica às margens da Rodovia BR 153 no KM 172 e tem o nome de Fazenda Beija Flor. Esta propriedade está localizada a aproximadamente 25 Km do perímetro urbano do município de Uruaçu, estado de Goiás, ao qual faz parte. A cidade de Uruaçu encontra-se localizada entre os Paralelos de 13° 46' 56" e 14° 47' 55" e os Meridianos 48° 32' 7" e 49° 36' 33" WGR e possui uma área de aproximadamente 2.141,824 km². Localizada às margens da BR-153, KM 200, Norte do Estado de Goiás, 280 quilômetros de Goiânia (capital do Estado) e 249 quilômetros de Brasília - Distrito Federal (capital federal do Brasil). A cidade conta com uma população estimada em 40.532 mil habitantes, sendo que, 86% vivem na zona urbana (IBGE, 2019a). A seleção da propriedade foi realizada usando amostragem por conveniência e por ela ser um cenário típico com as características necessárias para a aplicação da estratégia proposta neste trabalho.

A Fazenda Beija Flor tem uma área averbada de 110 hectares onde suas principais atividades são: suinocultura (cria, cria e engorda), bovinocultura leiteira e criação

de aves ornamentais (pavões e galinhas). Toda ração e silagens para a suinocultura e bovinocultura são produzidas na própria propriedade. A propriedade conta com a sede principal e mais duas casas utilizadas por colaboradores residentes. Na Figura 4.1 está representada a sede da propriedade juntamente com os galpões utilizados para a criação dos suínos e manejo dos bovinos leiteiros e as casas utilizadas pelos colaboradores.

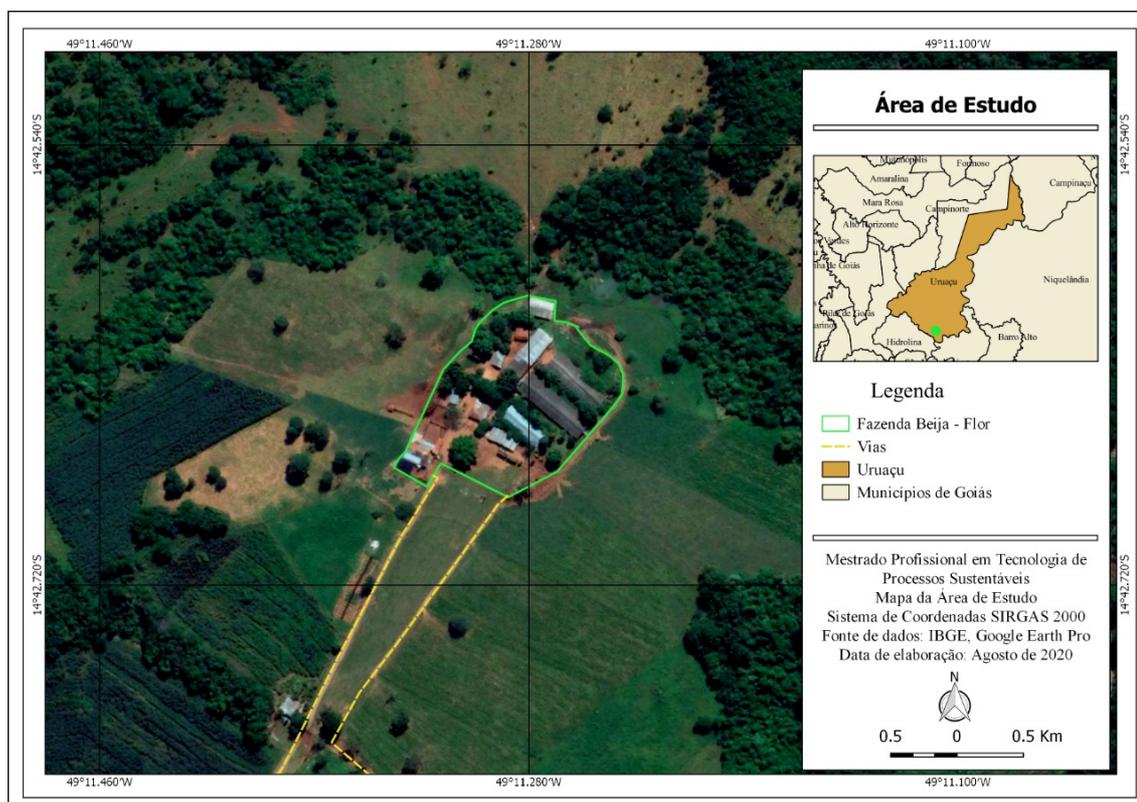


Figura 4.1: Área considerada como estudo de caso.

Fonte: (Próprio autor a partir de imagem do [GOOGLE](#) (2020)).

Na propriedade usada há duas fontes energéticas promissoras. Estas fontes podem ser exploradas em formato de GD, em modelos híbridos, *On-Grid*, de maneira a complementar com os serviços da rede elétrica da concessionária para suprir as necessidades elétricas da propriedade.

4.1.1 Manejo da propriedade

A propriedade tem uma rotina que está diretamente relacionada às necessidades da manutenção da suinocultura e da bovinocultura leiteira. Sua rotina é dividida em duas equipes (uma que cuida da bovinocultura leiteira e a outra que cuida da suinocultura), tendo as duas atividades compartilhadas mas trabalhando isoladamente. Devido a condições e particularidades específicas, alguns manejos são em caráter esporádico ou emergencial dependendo da demanda de cada caso e condições na propriedade.

Na bovinocultura leiteira as atividades começam às 04:00 h com o início do primeiro tratamento dos animais em lactação no coxo e início da primeira ordenha. Em condições normais a primeira ordenha termina às 09:00 h da manhã e logo após o final da mesma é realizada toda a assepsia de maquinários e da localidade. A partir deste horário inicia-se os outros trabalhos de aleitamento de bezerros, cura de animais e outros trabalhos corriqueiros deste tipo de rebanho. Às 14:30 h inicia-se a segunda ordenha onde é realizado o tratamento do rebanho um pouco antes do início dos trabalhos. Esta ordenha termina por volta das 15:30 h e novamente é realizada a assepsia do local e aleitamento dos bezerros. Semanalmente é produzido na propriedade a ração necessária para a bovinocultura em dois momentos.

A suinocultura tem um regime de trabalho e equipe diferenciadas conforme o período de vida dos animais. As matrizes reprodutoras (machos e fêmeas) recebem duas alimentações diárias e todos os dias após as 12:00 h os galpões são lavados. Os animais na maternidade, creche e terminação recebem alimentação constante servida por comedores automáticos.

O expediente da equipe que cuida da suinocultura começa às 08:00 h e termina às 17:00 h com uma hora de almoço. A maternidade é a única parte da propriedade que existe equipe de permanência constante no período de 24 horas. O expediente começa com o abastecimento dos comedouros e manutenção geral das estruturas. No período da tarde é produzida a ração dos animais.

Algumas áreas da propriedade são de uso comum como oficinas para manutenção e fábrica de ração. Boa parte do maquinário (como tratores, bombas d'água, trituradores e entre outros) também são compartilhados entre as equipes. Existem casas de funcionários que residem no local e um escritório onde são tratadas as questões administrativas da propriedade. O consumo elétrico das casas e escritório não foram considerados neste trabalho.

4.2 Aplicação do PBP

O *Bin Packing* é uma solução comumente utilizada para problemas de escalonamento e, apesar de haver outras estratégias possíveis, optou-se em investigar a validade de sua utilização devido ao seu grande potencial e adequação ao problema aqui tratado. Para que isso fosse possível foi necessário fazer a adequação do PBP às particularidades do problema tratado. Uma das mudanças principais está diretamente relacionada ao tamanho e quantidade dos *bins*. Uma vez que na modelagem proposta cada hora representa um *bin*, cujo tamanho é especificado pelo potencial de geração de energia desta hora, a quantidade de *bins* é fixa (sendo 24, quantidade de horas em um dia) e o tamanho de cada *bin* é

variável, pois cada hora possui um potencial diferente de geração, causada pela variação de energia fotovoltaica.

Outra modificação realizada diz respeito à capacidade de resolução do problema. Em variações de PBP com número fixo de *bins* quando o tamanho destes *bins* não é suficiente para acomodar todos os itens é dito que não há solução para a entrada em questão. Na modificação aqui proposta sempre haverá uma solução pois caso a energia potencial gerada não seja suficiente é possível utilizar energia da concessionária, sem imposição de qualquer limite quanto a este uso. Contudo, vale ressaltar que um dos objetivos principais da estratégia é reduzir ao máximo o consumo elétrico da rede de concessionárias ou idealmente não fazer uso desta fonte.

Um ponto muito importante que precisa ser considerado na estratégia está diretamente relacionado com a produção de energia elétrica do SFV que tem a sua produção determinada pela presença de luz solar disponível, não sendo possível, portanto, escalonar o potencial de geração. Por outro lado, no caso da energia elétrica produzida por biomassa é possível acumular o biogás em gasômetros, que são bolsas utilizadas para armazenar o biogás e produzi-la em momentos chave do dia para alimentar o sistema elétrico. Esta característica gera uma variância na alocação do uso desta fonte energética que precisa ser melhor definida conforme a heurística estabelecida.

Outra característica para a aplicação do PBP está relacionada com as dependências de uso de alguns equipamentos. Ao decorrer da pesquisa foram encontrados condições onde ao utilizar determinado equipamento eletroeletrônico haveria a necessidade ou uso de um ou mais equipamentos adicionais conjuntamente. Por este motivo, além de considerar o escalonamento de cada equipamento individualmente, foi investigado o escalonamento de grupos de equipamentos quando há dependência entre eles. Neste caso, o problema adaptado trata-se do PBPD (CAPUA, 2017).

Uma característica importante sobre o PBP é que, por ser altamente complexo encontrar soluções ótimas em tempo aceitável, há um conjunto de heurísticas que buscam obter resultados o mais próximo possível. Com isso, a solução encontrada pode ser diferente para cada heurística utilizada, o que gera a necessidade de avaliar as diferentes opções.

Conforme discutido na Seção 2.5.1 é possível utilizar o PBP para diferentes situações, em condições diversas. Para tal, é preciso que haja uma compreensão de como aplicar as heurísticas no caso específico aqui tratado. No Quadro 2.3 foram descritas as heurísticas escolhidas para a construção da estratégia proposta neste trabalho. A seleção destas heurísticas se deu pelo fato de serem as principais utilizadas na literatura relacionada à aplicação do PBP.

Estas heurísticas são representadas por algoritmos da classe tipo *Any Fit* (AF). Os algoritmos de AF são similares, sendo que no problema original utilizam uma estraté-

gia Λ para empacotar os itens em um conjunto de *bins*. Seja P uma permutação dos itens a serem empacotados, o algoritmo empacotará os itens um a um na ordem da permutação segundo a estratégia de empacotamento Λ . Seja B o conjunto de recipientes abertos, a estratégia procura o recipiente aberto em B que melhor satisfaz Λ e empacota o item nele, caso possível. Caso contrário, abre um novo recipiente no qual o item será empacotado.

Nas próximas seções é discutido como cada uma das heurísticas consideradas foi adaptada para ser usada na solução de escalonamento de consumo. Esta adaptação foi realizada de forma a manter a essência das heurísticas, ou seja, não interferir na sua proposição. Outro ponto importante está relacionado com a energia produzida por biomassa que na estratégia proposta é utilizada como energia em potencial, escalonada de acordo as condições de cada heurísticas e sua disponibilidade.

4.2.1 *First Fit*

First Fit é uma heurística na qual a maneira de tratamento é alocar o primeiro item dentro do primeiro *bin* aberto na lista B tal que as restrições sejam respeitadas. Caso não seja possível colocar o próximo item dentro do mesmo *bin*, seja por motivos de espaço ou das restrições, o mesmo seguirá para um próximo *bin* que será criado.

Na adaptação proposta, como pode ser visto no Algoritmo 4.1, para cada equipamento é realizado uma tentativa de escalonamento na primeira hora que há energia disponível, considerando tanto a energia fotovoltaica quanto a energia por biomassa. Nos casos que a energia produzida não é suficiente para o consumo do equipamento, este é escalonado para a primeira que haja energia em potencial que é completada com a energia da concessionária. De acordo com esta proposição, nesta heurística é esperado que a produção por biomassa seja escalonada para as primeiras horas do dia.

Algoritmo 4.1: First-Fit(e, h)

Entrada: conjunto de equipamentos (e) e horas (h), com respectivo potencial de geração energética.

Saída: escalonamento dos equipamentos.

```

1 para cada equipamento  $e$  faça
2   para  $h \leftarrow 0$  até 23 faça
3     capacidade  $\leftarrow$  produção fotovoltaica + produção possível por
4       biogás
5     se capacidade  $\geq$  consumo do equipamento então
6       Escalona equipamento para hora  $h$ 
7     fim
8   se não foi possível escalonar  $e$  então
9      $h \leftarrow$  primeira hora que ainda possui energia potencial ou 0 se não
10      houver nenhuma
11     Escalona  $e$  para  $h$  utilizando energia da concessionária
12   fim

```

4.2.2 *First Fit Decreasing*

Na *First Fit Decreasing* os itens são ordenados em sua ordem decrescente de tamanho e nesta ordem o próximo item é sempre colocado no primeiro *bin* onde se encaixa. Com esta solução de empacotamento dos itens maiores primeiro, os possíveis “gargalos” do problema são resolvidos logo, intuitivamente facilitando a solução.

Como pode ser visto no Algoritmo 4.2, na adaptação proposta os equipamentos são ordenados de forma decrescente considerando sua potência nominal como fator de grandeza. A partir daí, o funcionamento do algoritmo é similar à heurística *First Fit*, ou seja, busca-se alocar o equipamento na primeira hora em que haja disponibilidade. Caso não haja nenhuma com produção suficiente a alocação é realizada na primeira que há alguma energia potencial disponível.

Algoritmo 4.2: First-Fit-Decreasing(e, h)

Entrada: conjunto de equipamentos (e) e horas (h), com respectivo potencial de geração energética.

Saída: escalonamento dos equipamentos.

```

1 Ordena equipamentos em ordem decrescente de consumo
2 para cada equipamento  $e$  faça
3   para  $h \leftarrow 0$  até 23 faça
4     capacidade  $\leftarrow$  produção fotovoltaica + produção possível por
       biogás
5     se capacidade  $\geq$  consumo do equipamento então
6       Escalona equipamento para hora  $h$ 
7     fim
8   fim
9   se não foi possível escalonar  $e$  então
10      $h \leftarrow$  primeira hora que ainda possui energia potencial ou 0 se não
       houver nenhuma
11     Escalona  $e$  para  $h$  utilizando energia da concessionária
12   fim
13 fim

```

4.2.3 *Best Fit Decreasing*

Para a *Best Fit Decreasing* a estratégia de tratamento consiste em empacotar um item no *bin* aberto que atenda todas as restrições do caso e que menos terá espaço livre após o item ser colocado. Caso não seja possível empacotar o item em nenhum *bin* aberto, por motivos de restrições, é aberto um novo *bin* no qual o item será colocado.

Nesta heurística, conforme apresentado no Algoritmo 4.3 os equipamentos com maior consumo nominal serão alocados na hora que tenha produção suficiente e que deixar o menor espaço possível após a alocação. Neste caso, quando não houver mais disponibilidades para a alocação é considerado o uso da energia elétrica provinda da concessionária na hora em que há mais energia potencial disponível. Esta seleção é utilizada usando a propriedade de que esta hora seria selecionada pela heurística original caso houvesse um aumento suficiente de energia para todas as horas.

Algoritmo 4.3: Best-Fit-Decreasing(e, h)

Entrada: conjunto de equipamentos (e) e horas (h), com respectivo potencial de geração energética.

Saída: escalonamento dos equipamentos.

```

1 Ordena equipamentos em ordem decrescente de consumo
2 para cada equipamento  $e$  faça
3    $S \leftarrow$  conjunto de horas para as quais é possível escalonar  $e$ 
4   se  $S$  não for vazio então
5     Escalona  $e$  para a hora  $h \in S$ , onde  $h$  é a hora com mínima
       capacidade restante após o escalonamento de  $e$ , isto é, o
       equipamento “se encaixa melhor”.
6   fim
7   se não foi possível escalonar  $e$  então
8      $h \leftarrow$  hora que possui mais capacidade restante ou 0 se não houver
       nenhuma
9     Escalona  $e$  para  $h$  utilizando energia da concessionária
10  fim
11 fim

```

4.2.4 Worst Fit Decreasing

Para a *Worst Fit Decreasing* a estratégia de tratamento consiste em empacotar um item no *bin* aberto que atenda as restrições do caso e que mais terá espaço livre após o item ser colocado lá. Da mesma forma que nas heurísticas anteriores, caso não seja possível dispor o item em algum *bin* aberto, por motivos de restrições, é aberto um novo *bin* no qual o item será colocado.

Como pode ser visto no Algoritmo 4.4, a adaptação proposta pode ser considerada contrária à proposta para a heurística *Best Fit Decreasing*, ou seja, a seleção da hora para a qual o equipamento será escalonado ocorre para aquela em que haverá maior quantidade de energia disponível após sua alocação. De maneira complementar, quando não há nenhuma hora em que seja possível realizar o escalonamento, a hora que possui menor energia restante é selecionada. Isso também ocorre porque caso houvesse energia adicional suficiente de maneira igual para todas as horas, esta seria selecionada pela heurística original.

Algoritmo 4.4: Worst-Fit-Decreasing(e, h)

Entrada: conjunto de equipamentos (e) e horas (h), com respectivo potencial de geração energética.

Saída: escalonamento dos equipamentos.

```

1 Ordena equipamentos em ordem decrescente de consumo
2 para cada equipamento  $e$  faça
3    $S \leftarrow$  conjunto de horas para as quais é possível escalonar  $e$ 
4   se  $S$  não for vazio então
5     Escalona  $e$  para a hora  $h \in S$ , onde  $h$  é a hora com máxima
       capacidade restante após o escalonamento de  $e$ , isto é, o
       equipamento “se encaixa pior”.
6   fim
7   se não foi possível escalonar  $e$  então
8      $h \leftarrow$  hora que possui menos capacidade restante ou 0 se não
       houver nenhuma
9     Escalona  $e$  para  $h$  utilizando energia da concessionária
10  fim
11 fim

```

4.2.5 *Second Worst Fit Decreasing*

Basicamente, a *Second Worst Fit Decreasing* tem o comportamento semelhante ao *Worst Fit Decreasing* com a diferença na seleção do *bin* em que será colocado o item, visto que nesta heurística é selecionado o segundo que mais terá espaço livre após o item ser colocado, em vez do primeiro.

O Algoritmo 4.5 demonstra a adaptação proposta, na qual a seleção da hora para a qual o equipamento será escalonado ocorre para a segunda considerando a ordem decrescente de energia disponível após sua alocação. Quando não há nenhuma hora em que seja possível realizar o escalonamento, a segunda hora que possui menor energia restante é selecionada. Isso também ocorre porque, de maneira semelhante à *Worst Fit Decreasing*, caso houvesse energia adicional suficiente de forma igual para todas as horas, esta seria selecionada pela heurística original.

Algoritmo 4.5: Second-Worst-Fit-Decreasing(e, h)

Entrada: conjunto de equipamentos (e) e horas (h), com respectivo potencial de geração energética.

Saída: escalonamento dos equipamentos.

```

1 Ordena equipamentos em ordem decrescente de consumo
2 para cada equipamento  $e$  faça
3    $S \leftarrow$  conjunto de horas para as quais é possível escalonar  $e$ 
4   se  $S$  não for vazio então
5     Escalona  $e$  para a hora  $h \in S$ , onde  $h$  é a hora com maior
       capacidade restante após o escalonamento de  $e$ , excluindo-se a
       máxima, isto é, o equipamento “se encaixa quase pior”.
6   fim
7   se não foi possível escalonar  $e$  então
8      $h \leftarrow$  segunda hora que possui menos capacidade restante ou 0 se
       não houver nenhuma
9     Escalona  $e$  para  $h$  utilizando energia da concessionária
10  fim
11 fim

```

4.3 Avaliação inicial das heurísticas propostas considerando o estudo de caso

Como uma primeira tentativa na construção de uma solução otimizada para o escalonamento de consumo, foi realizada uma simplificação do problema. Mais precisamente, considerou-se apenas o escalonamento dos equipamentos com cargas deslocáveis e sem necessariamente considerar períodos contínuos de uso, ou seja, o escalonamento foi realizado de forma independente a cada hora, considerando o perfil de utilização do equipamento. É considerado os coeficientes de energia em potencial disponíveis na propriedade a partir de SFV e biomassa. Quanto ao consumo elétrico, foram considerados os dados sobre as características dos equipamentos elétricos existentes e seus horário de funcionamento.

Para realizar a modelagem foram coletados dados do funcionamento da propriedade, considerando um período de tempo de 10 dias, entre 14 de setembro de 2020 e 23 de setembro de 2020. Na análise do consumo de energia, apenas a estrutura funcional do parque elétrico necessária ao funcionamento das atividades produtivas foi considerado. Inicialmente, foram analisados os resultados relativos a um único dia, selecionado aleatoriamente entre os dias úteis analisados. A Tabela [4.1](#) apresenta o modelo de consumo de

energia para o dia selecionado (16 de setembro de 2020), no qual dos 16 equipamentos modelados, apenas 10 foram utilizados neste dia.

Tabela 4.1: Modelo do consumo na propriedade para no dia 16 de setembro 2020

ID	Descrição	ω	T	$hm_{início}$	hm_{final}	c
e_1	Tanque de leite 01	1.864,25	1.440	{0:00}	{23:59}	1,86
e_2	Tanque de leite 02	1.491,4	0	\emptyset	\emptyset	0,00
e_3	Bomba d'água - G02	1.103,25	210	{0:00}	{23:59}	1,10
e_4	Bomba d'água - G03	2.206,5	0	\emptyset	\emptyset	0,00
e_5	Bomba d'água - G04	1.471	0	\emptyset	\emptyset	0,00
e_6	Bomba d'água - G05	1.471	195	{0:00}	{23:59}	3,52
e_7	Bomba d'água - ORD1	735.5	10	{08:15, 08:20}	{16:10, 16:15}	0,31
e_8	Bomba d'água - ORD2	735.5	33	{08:15, 08:30}	{16:00, 16:30}	0,18
e_9	Bomba d'água - COR	1.471	505	{0:00}	{23:59}	3,52
e_{10}	Compressor 01	1.471	0	\emptyset	\emptyset	0,00
e_{11}	Compressor 02	1.471	0	\emptyset	\emptyset	0,00
e_{12}	Boiler	3.000	335	{05:00, 08:30}	{14:00, 16:00}	3,00
e_{13}	Ordenhadeira	2.206,5	335	{05:00, 08:30}	{14:00, 16:00}	3,00
e_{14}	Triturador	7.354,99	395	{0:00}	{23:59}	12,27
e_{15}	Silo 01	2.206,5	395	{0:00}	{23:59}	3,93
e_{16}	Silo 02	2.206,5	0	\emptyset	\emptyset	0,00

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Os valores de ω foram obtidos por meio de consulta aos manuais dos equipamentos, enquanto para estabelecer T , $hm_{inicial}$, e hm_{final} foram realizadas entrevistas com funcionários da propriedade. A Figura 4.2 demonstra o consumo elétrico total no estudo de caso, onde o montante em cada hora é definido como o momento de utilização dos equipamentos ocorrido na propriedade no dia em questão, realizado sem qualquer estratégia de escalonamento.

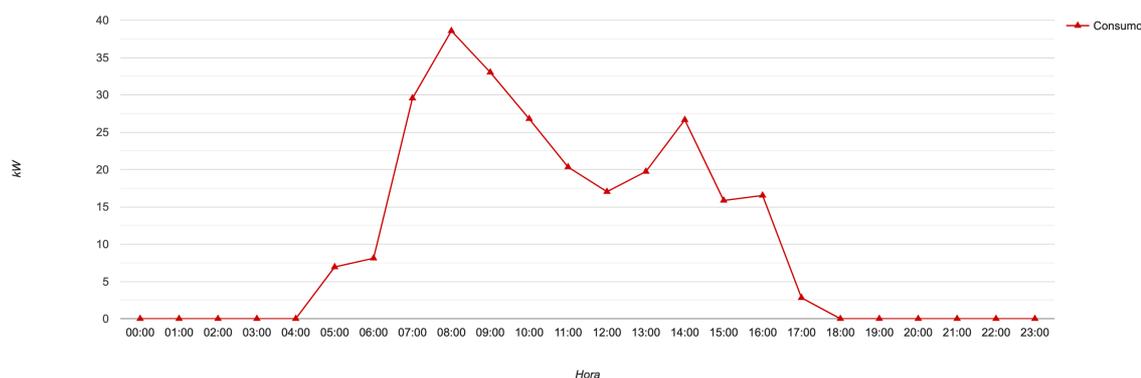


Figura 4.2: Consumo total elétrico do estudo de caso no dia 16 de setembro de 2020.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

A aplicação do modelo de potencial energético baseado em biomassa levou em consideração o número de animais na propriedade na data discutida de 16 de setembro de 2020. Para a quantificação dos dejetos bovinos disponíveis e viáveis foi realizado a coleta de material diário encontrado na área de espera da ordenha durante o período de 30 dias na propriedade usada como estudo de caso. Durante a coleta foram considerados o tamanho da área com calçamento onde foi coletado o material, a variação de animais ordenhados por dia e as condições gerais de manejo. Ao final do período e utilizando os dados obtidos durante os 30 dias de coleta foi estabelecido uma média de 1,700 L/animal/dia para o caso da propriedade usada no estudo. A quantidade total de efluentes, calculada de acordo com os indicadores apresentados na Seção 3.1, é apresentada na Tabela 4.2.

Foi estabelecido que a avaliação considera 12 (doze) horas de produção de energia elétrica diária usando biomassa, em virtude do potencial de geração, da quantidade de energia requerida, dimensionamento do conjunto gerador e a disponibilidade de biogás/dia. Devido às condições citadas é possível dimensionar o coeficiente de produção em kWh/d de acordo à quantidade de matéria-prima disponível por dia.

Em relação à geração fotovoltaica, os dados de irradiância e temperatura utilizados para a quantificação de energia são provenientes de uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET 2019), localizada na cidade de Porangatu - Goiás, Brasil, próxima à propriedade. No momento em que a avaliação foi realizada, não havia dados disponíveis para 16 de setembro de 2020. Desta forma, foram utiliza-

Tabela 4.2: *Produção total de efluentes no estudo de caso.*

TIPO	CATEGORIA	α	$L_{\text{animal}}/\text{dia}$	$SV(g^{SV}/L)$	$\beta_0(m^3_{\text{CH}_4}/Kg_{\text{SV}})$
Suinocultura	Maternidade (matriz fêmea + leitões)	8	216	7.642,08	3,44
	Leitão creche	90	126	4.457,88	2,01
	Matriz (fêmea)	40	640	22.643,20	10,19
	Matriz (macho)	2	18	636,84	0,29
	Crescimento e terminação	268	1.876	66.372,88	29,87
Bovinocultura	Leiteira	82	213,28	10.779,27	4,31
Total			3.089,28	112.532,15	50,10

Fonte: (Elaborado pelo autor).

dos os dados de 16 de setembro de 2019. Essa estratégia de análise é aceitável, pois os dados dessa categoria estão sujeitos à sazonalidade e apresentam um padrão semelhante, dado pelo período do ano (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A Figura 4.3 apresenta a produção elétrica total do dia considerado os sistemas de biomassa e fotovoltaico. Neste caso o consumo da produção por biomassa foi definida empiricamente como contínua, sem levar em consideração qualquer estratégia de escalonamento.

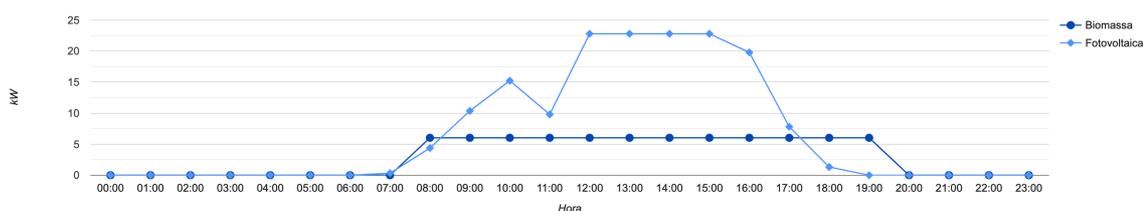


Figura 4.3: *Produção elétrica total a partir de biomassa e fotovoltaica para o dia 16 de setembro de 2020.*

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Como forma de demonstrar a discrepância entre o consumo e a potencia de geração quando não há qualquer mecanismo de otimização, a Figura 4.4 apresenta de forma conjunto os dados para o dia analisado. É importante ressaltar que o consumo levou em consideração o período de uso do equipamento, o que ocorreu sem nenhum mecanismo auxiliar de otimização.

Conforme mostrado na Figura 4.4, a ausência de uma estratégia de otimização

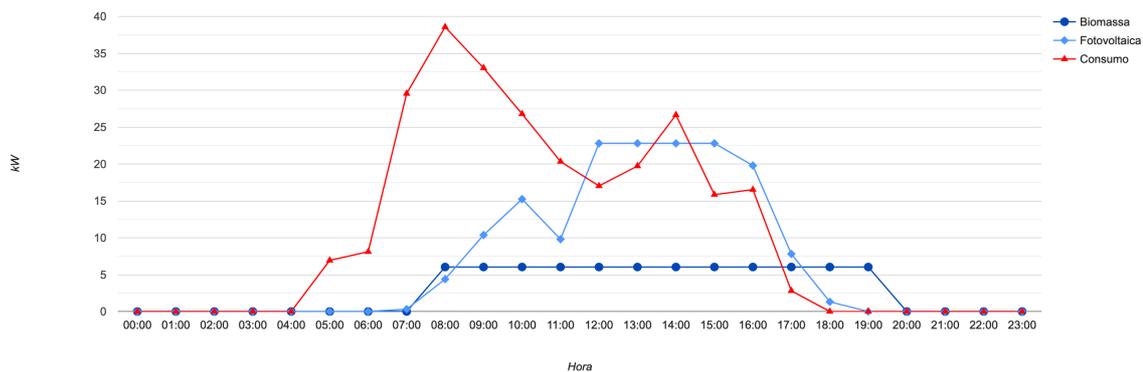


Figura 4.4: Comparação de consumo e energia potencial em 16 de setembro de 2020.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

significa que a energia potencial não é utilizada adequadamente, uma vez que grande parte da carga de consumo é realizada fora de períodos de maior geração. Esse comportamento sugere que uma solução de otimização pode minimizar ou, pelo menos, reduzir consideravelmente a quantidade de energia consumida da concessionária.

Os resultados das diferentes heurísticas adaptadas e aplicadas no estudo de caso usado como modelo para este trabalho são apresentados nas Figuras 4.5 a 4.9 com os comportamentos em separado de cada heurística considerada. Em cada uma destas figuras é apresentado novamente o escalonamento tido até então, denominado escalonamento empírico, como forma de visualizar as diferenças. A geração de energia pode se diferenciar em cada cenário em virtude do escalonamento da produção por biogás, realizado pela heurística.

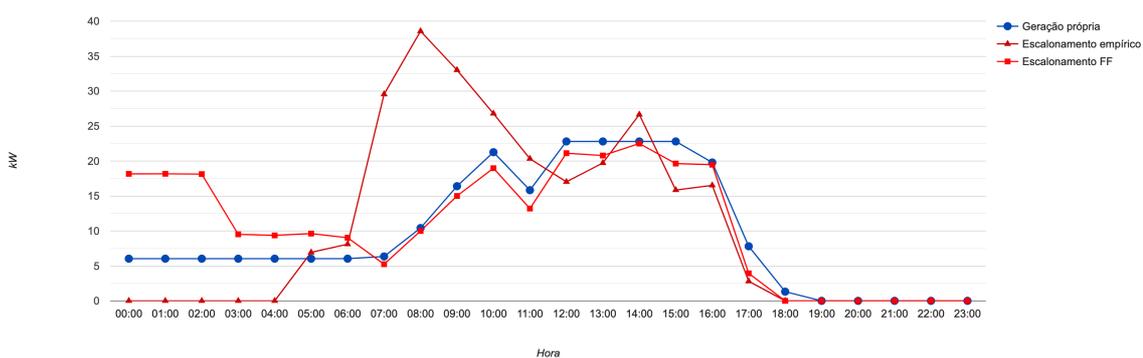


Figura 4.5: Escalonamento dado pela heurística FF para o dia 16 de setembro de 2020.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Para auxiliar na interpretação dos resultados, a Tabela 4.3 apresenta o consumo total da concessionária medido em cada heurística, assim como a energia produzida e não utilizada.

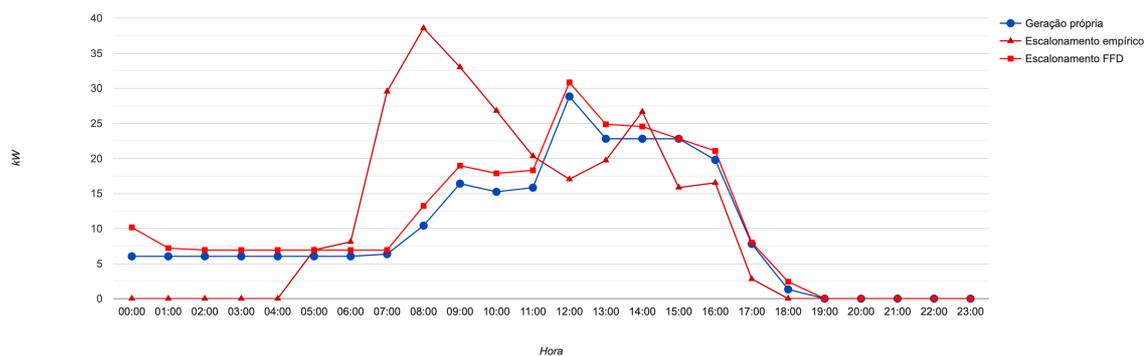


Figura 4.6: Escalonamento dado pela heurística FFD para o dia 16 de setembro de 2020.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

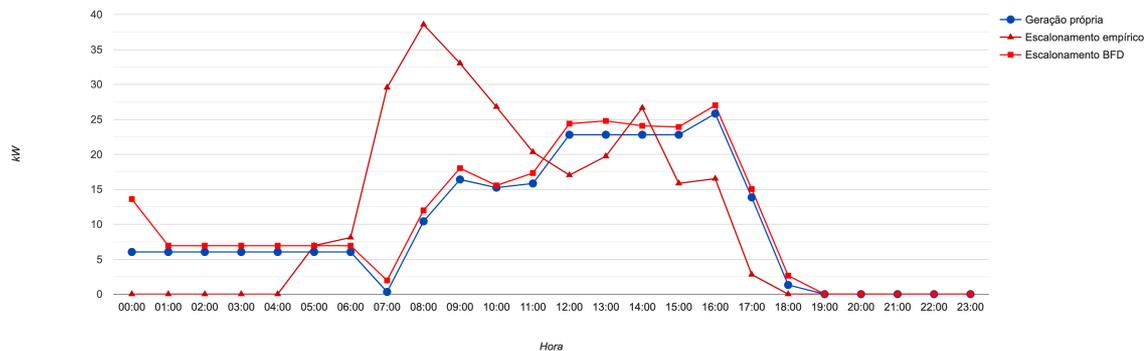


Figura 4.7: Escalonamento dado pela heurística BFD para o dia 16 de setembro de 2020.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

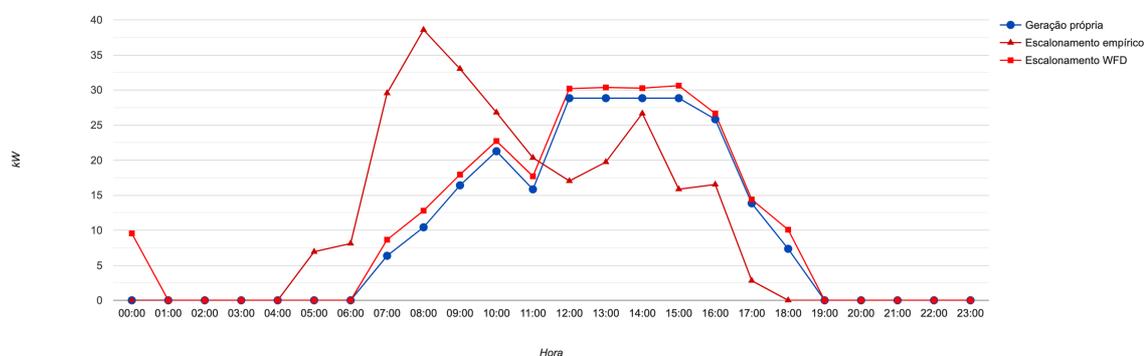


Figura 4.8: Escalonamento dado pela heurística WFD para o dia 16 de setembro de 2020.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

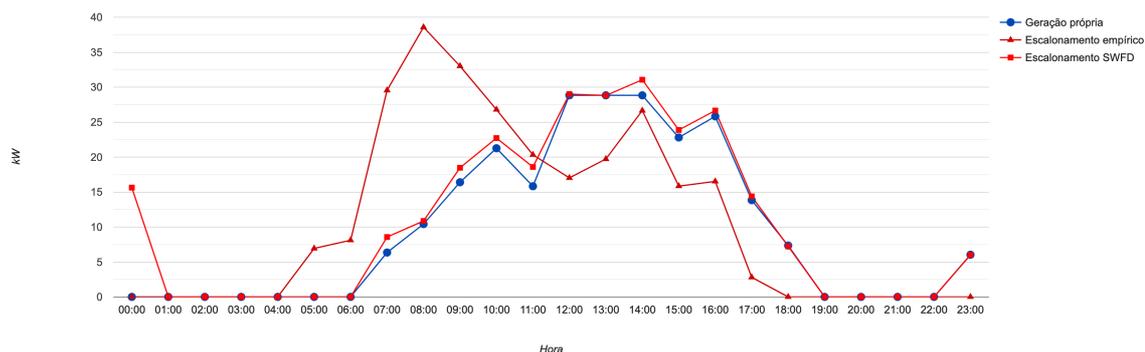


Figura 4.9: Escalonamento dado pela heurística SWFD para o dia 16 de setembro de 2020.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Tabela 4.3: Resultados obtidos nas aplicações das heurísticas para o dia 16 de setembro de 2020.

HEURÍSTICA	Energia total consumida da concessionária (kWh)	Energia produzida e não utilizada (kWh)
FF	49,7795	20,5181
FFD	29,2614	0,0
BFD	29,2614	0,0
WFD	29,2614	0,0
SWFD	29,4241	0,1627

Fonte: (Elaborado pelo autor).

De acordo com estes resultados iniciais, com exceção da heurística FF, as demais conseguiram explorar bem o potencial de geração. Em complemento, as heurísticas WFD e SWFD tiveram a vantagem adicional de concentrar o escalonamento em um período, conforme pode ser visualizado nos gráficos. Isso é vantajoso pela possibilidade de alocar de forma contínua as horas de pessoal permanente na propriedade, simplificando a contratação.

A exploração destes resultados iniciais foram essenciais para ilustrar o comportamento das heurísticas e compreender seu funcionamento, além de obter uma macrovisão comportamental do escalonamento no estudo de caso. Contudo, para se obter resultados mais confiáveis é necessário realizar uma avaliação mais ampla considerando um conjunto maior de entradas. Esta avaliação é iniciada na próxima seção.

4.4 Análise de mais cenários do problema

Uma das formas de realizar uma avaliação mais completa para o cenário proposto seria considerar mais dias do estudo de caso. Contudo, a variação nos equipamentos e seus respectivos usos não seriam suficientes para permitir essa análise, sobretudo porque foram coletados dados de apenas 10 dias de funcionamento da propriedade. Dessa forma, optou-se por utilizar uma estratégia de simulação utilizando dados sintéticos.

Foi considerado o uso de um conjunto de dados (*dataset*) para o PBP, originalmente proposto por Falkenauer (1996) e adaptado posteriormente por Muritiba et al. (2010). O uso deste conjunto de dados se deve ao fato deste ser uma boa base para validação de soluções do PBP. Contudo, não é possível explorar na avaliação aqui realizada outras vantagens de uso deste conjunto, como a representação de soluções ótimas, visto que tais soluções não se aplicam ao problema aqui tratado devido à diferença na quantidade e tamanho dos *bins*.

O conjunto de dados originalmente proposto por Falkenauer (1996) é composto por 8 (oito) classes do PBP, variando a quantidade, peso e capacidade dos *bins*. A Tabela 4.4 apresenta uma descrição deste conjunto.

Tabela 4.4: *Propriedades do conjunto de dados original.*

Classe	Nº de itens	Pesos dos itens	Capacidade dos <i>bins</i>	Propriedade
1	120	[20, 100]	150	Nenhuma adicional
2	250		150	
3	500		150	
4	1000		150	
5	60	[250, 500]	1000	Cada <i>bin</i> pode ser preenchido de maneira exata por 3 itens
6	120		1000	
7	249		1000	
8	501		1000	

Fonte: (Elaborado pelo autor).

A partir deste conjunto, Muritiba et al. (2010) elaboraram um novo, incluindo informações sobre conflitos entre os itens, adicionando subclasses onde cada subclasse representa um grafo de conflitos com densidade variando de 0,0 a 0,9. Para cada subclasse foram propostas 10 instâncias do problema. Uma vez que um dos objetivos do trabalho é analisar a questão das dependências entre os equipamentos, optou-se por utilizar este segundo conjunto de dados transformando conflitos em dependências.

Foi necessário construir um novo conjunto de dados a partir do considerado. Isso se deve ao fato das propriedades não fazerem sentido no problema aqui tratado. A primeira adaptação foi a redução das quatro classes iniciais, visto que a propriedade de cada *bin* poder ser preenchido de maneira exata por 3 itens, referente às classes 5 a 8, não faz sentido no cenário de escalonamento de consumo.

Outra modificação necessário foi com relação à quantidade e peso dos itens no conjunto de dados, visto que os valores iniciais são muito elevados para representar quantidade de equipamentos e consumo, respectivamente. A transformação foi realizada considerando apenas 10% da quantidade de equipamentos e 4% do peso. Esses valores foram escolhidos visando definir uma quantidade aceitável comumente encontrada em propriedades rurais e, também, considerando o consumo visualizado no estudo de caso. A capacidade dos *bins* representada no conjunto utilizado foi ignorada.

Com as transformações realizadas, o conjunto de dados desenvolvido possui 4 classes, onde cada subclasse tem 10 níveis de densidade e cada nível tem 10 instâncias, totalizando 400 entradas distintas para o problema. Para cada equipamento foi considerado um tempo de uso randomicamente atribuído entre 10 minutos (menor tempo de uso observado no estudo de caso) e 24 horas (tempo total possível). Os valores foram gerados de forma que apenas 10% dos equipamentos tivessem tempo de uso superior a 8 horas. Esta condição teve por objetivo trazer os resultados para condições reais de uso. Na Tabela 4.5 estão descritos as propriedades do conjunto de dados desenvolvido.

Tabela 4.5: *Propriedades do conjunto de dados adaptado.*

Classe	Nº de itens	Peso dos itens	Capacidade dos <i>bins</i>
1	12	[0.8, 4]	Não se aplica, dado pelo potencial de geração
2	25		
3	50		
4	100		

Fonte: (Elaborado pelo autor).

A primeira avaliação realizada utilizando este conjunto de dados considerou apenas um único dia, definido como o mesmo utilizado na avaliação inicial (16 de setembro de 2020). Após a aplicação das heurísticas utilizando o conjunto de dados adaptado, para 82 instâncias do problema (20,5% do total) as heurísticas chegaram ao mesmo resultado de escalonamento. Isso se deve aos casos em que há uma quantidade elevada de equipamentos e/ou consumo elevado de forma isolada, o que faz com que o escalonamento não reflita qualquer influência no consumo pela insuficiência de energia produzida.

Os resultados da alocação foram analisados levando em consideração apenas a quantidade de energia consumida da concessionária e a quantidade de energia produzida e não utilizada. Mesmo considerando apenas estas variáveis, a quantidade de dados a ser analisada é elevada dificultando a apresentação de resultados em sua totalidade de maneira visual. Com isso, foi realizada uma análise estatística sobre estes resultados. Para tal, excluiu-se os casos listados acima, em que todas as heurísticas chegaram ao mesmo resultado.

A Tabela 4.6 apresenta a porcentagem de casos em que a heurística obteve o melhor resultado, excluindo os casos em que todas obtiveram o mesmo resultado. Por melhor resultado na análise realizada considera-se o menor consumo de energia da concessionária.

Tabela 4.6: Resultados de aplicação das heurísticas para o dia 16 de setembro de 2020, excluindo casos em que todas obtiveram mesmo resultado.

Heurística	Porcentagem de instâncias do problema
FF	77,36
FFD	78,62
BFD	78,87
WFD	80,50
SWFD	0,31

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Observando os resultados, foi possível identificar também que mesmo excluindo os casos em que todas as heurísticas chegam ao mesmo resultado, ainda há situações de equivalências entre elas, ou seja, casos em que duas ou mais heurísticas chegam ao mesmo resultado. Em virtude disso, foram analisados os casos em que uma única heurística obtém o melhor escalonamento. Os resultados são apresentados na Tabela 4.7

Também foi analisado a diferença de consumo da concessionária entre a melhor e a pior heurística em cada instância. A Figura 4.10 apresenta a diferença considerando apenas as 120 instâncias com maior diferença, visto que para as demais a diferença foi muito pequena dificultando a visualização. Este resultado reforça a importância de se escolher de forma adequada a heurística a ser utilizada visto que é possível visualizar uma diferença de até 10,11 kWh.

Esta avaliação permite traçar algumas conclusões sobre a adoção das heurísticas, visto que a WFD apresentou os melhores resultados considerando o conjunto total, embora a FF tenha sido melhor quando há só uma que encontra a melhor solução. Contudo, como forma de incluir maior variabilidade na análise, a avaliação foi expandida

Tabela 4.7: Resultados de aplicação das heurísticas para o dia 16 de setembro de 2020, considerando apenas os casos em que há uma única heurística que obtém o melhor resultado.

Heurística	Porcentagem de instâncias do problema
FF	52,46
FFD	6,56
BFD	19,67
WFD	21,31
SWFD	0,00

Fonte: (Elaborado pelo autor).

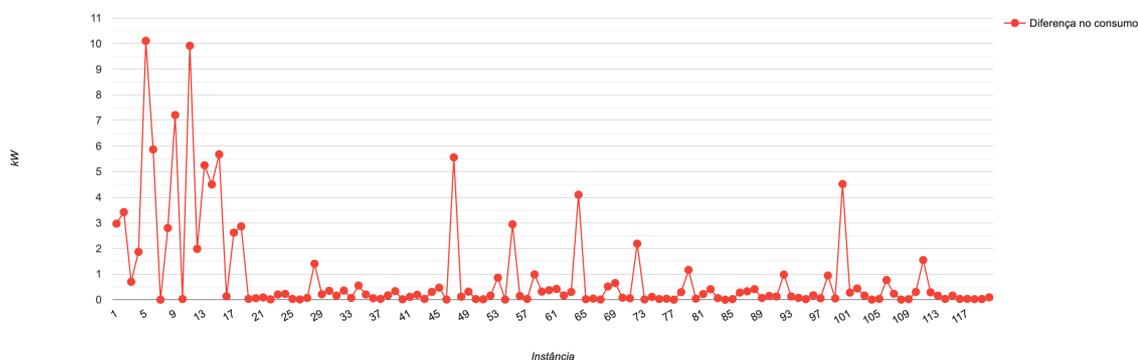


Figura 4.10: Diferença de consumo da concessionária entre a melhor e a pior heurística para 120 instâncias do problema.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

considerando todos os dias do ano, em vez de somente 1, totalizando neste caso 146.000 instâncias do problema. Com isso, foi incluída na análise a variação na geração de energia. Foram usados os dados relativos ao ano de 2019 por indisponibilidade de todos os dados de 2020.

Realizando análise semelhante à realizada anteriormente, para 36.599 instâncias, equivalente a 33,64% do total, as heurísticas chegaram ao mesmo resultado, pelo mesmo motivo de elevada quantidade de equipamentos e consumo. Estes casos foram excluídos da análise. A Tabela 4.8 apresenta os resultados sobre a porcentagem de instâncias para as quais a heurística chegou ao melhor resultado.

Analisando os casos em que há uma única heurística que obteve o melhor resultado, os resultados são apresentados na Tabela 4.9.

Com este experimento foi possível observar que, apesar da heurística WFD nova-

Tabela 4.8: *Resultados de aplicação das heurísticas para todos os dias de 2019, excluindo casos em que todas obtiveram mesmo resultado.*

Heurística	Porcentagem de instâncias do problema
FF	40,41
FFD	24,01
BFD	29,38
WFD	32,15
SWFD	1,62

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Tabela 4.9: *Resultados de aplicação das heurísticas para todos os dias de 2019, considerando apenas os casos em que há uma única heurística que obtém o melhor resultado.*

Heurística	Porcentagem de instâncias do problema
FF	41,94
FFD	12,79
BFD	20,95
WFD	23,46
SWFD	0,85

Fonte: (Elaborado pelo autor).

mente ter apresentado resultado melhor que a maioria das demais heurísticas, a heurística FF passou a ter um desempenho melhor. Essa mudança na posição das heurísticas pode estar relacionado com o potencial de geração de energia do dia selecionado na análise anterior visto que ele ocupa a 48^a posição quanto ao potencial de geração no ano analisado, ou seja, 86,85% dos demais dias possuem potencial inferior. Visto que há uma análise dos equipamentos considerando a ordenação de consumo, considerando aqueles que realizam maior consumo primeiro, provavelmente o menor potencial de geração faz com que a heurística WFD não atinja melhor resultado. Contudo, é preciso analisar o resultado para cada dia isoladamente para obter conclusões mais assertivas.

Novamente, foi analisado a diferença de consumo da concessionária considerando o melhor e o pior escalonamento quando as heurísticas chegaram a resultados distintos. Neste caso, houve uma diferença de até 15,89 kWh, embora a diferença seja inferior a 1 kWh para a maioria dos casos, como demonstrado nas Figuras 4.11 e 4.12. Para a

apresentação dos dados foi necessário o fracionamento e divisão devido ao tamanho das discrepância ente os mesmos.

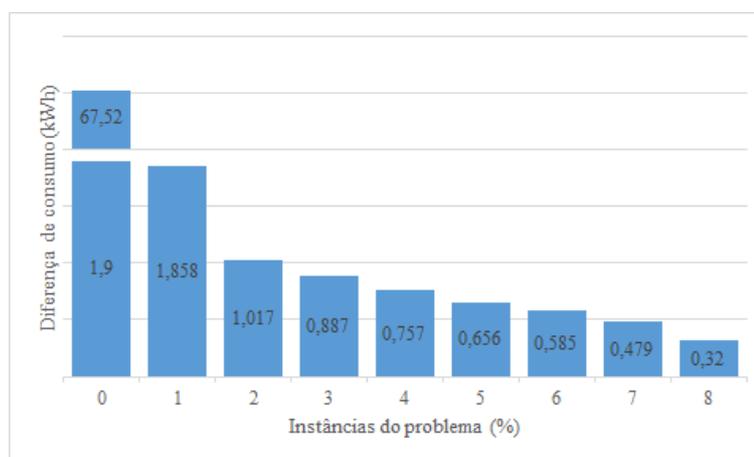


Figura 4.11: *Diferença de consumo de energia da concessionária quando as heurísticas chegam a resultados distintos, considerando todos os dias de 2019 (parte 1).*

Fonte: (Elaborado pelo autor).

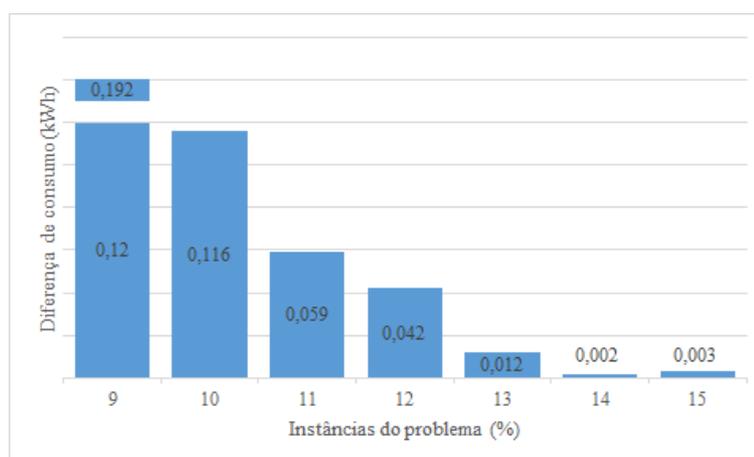


Figura 4.12: *Diferença de consumo de energia da concessionária quando as heurísticas chegam a resultados distintos, considerando todos os dias de 2019 (parte 2).*

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Analisando ainda os casos em que a heurística não utilizou toda energia produzida, embora tenha havido ao menos alguma outra que explorou toda a capacidade, obtém-se os resultados apresentados na Tabela [4.10](#). É apresentado a porcentagem de instâncias no qual isso ocorre, considerando o conjunto de instâncias para as quais ao menos uma heurística utilizou todo o potencial. Também é apresentada a média da energia não utilizada nestes casos, considerando um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.10: Capacidade de energia produzida e não utilizada, considerando todos os dias de 2019.

Heurística	Porcentagem de instâncias para as quais há energia produzida que não foi utilizada	Energia não utilizada (kWh) com intervalo de confiança de 95%
FF	4,69	3,97 ± 0,07
FFD	1,26	0,70 ± 0,03
BFD	1,04	0,23 ± 0,01
WFD	0,06	0,80 ± 0,22
SWFD	99,99	0,18 ± 0,01

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Diante deste resultado é possível chegar à conclusão de que, embora a heurística FF seja aquela que utiliza menos energia da concessionária na maioria dos casos (40,41% das instâncias contra 32,15% das instâncias para a heurística WFD no outro experimento), na realidade a heurística WFD é preferível por conseguir explorar de maneira mais satisfatória a energia produzida, visto que é aquela que menos apresenta casos em que a energia produzida não é utilizada em sua totalidade.

4.5 Inclusão das dependências entre os equipamentos

Ao analisar o estudo de caso foi observado que existem equipamentos dependentes um do outro para o funcionamento. Em alguns estágios de produção em propriedades existe a necessidade de utilizar equipamentos que sua funcionalidade irá depender diretamente do funcionamento de outro equipamento eletroeletrônico anteriormente, em paralelo ou posteriormente. Partindo deste pressuposto surgiu a necessidade de avaliar as condições de funcionamento para estes casos.

Uma forma viável para solucionar esta questão seria a reimplementação dos algoritmos para considerar os casos onde houver dependências. No entanto, observou-se que existia uma forma mais simples e direta para solucionar este problema. Foi realizado um pré-processamento no qual é considerado que, quando houver dependência de funcionamento entre equipamentos os mesmos serão tratados de forma conjunta como um único equipamento cujo consumo é considerado como o somatório total de suas cargas. A Figura 4.11 apresenta como é feito o agrupamento dos equipamentos eletroeletrônicos utilizado para solucionar as questões de dependência nas heurísticas adaptadas.

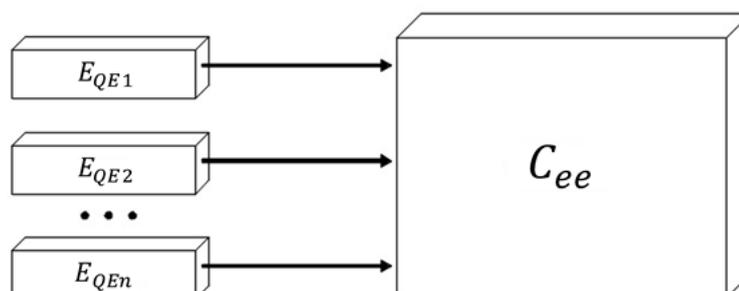


Figura 4.13: Representação do agrupamento dos equipamentos no problema.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Com o pré-processamento proposto não é necessário que haja mudanças ou novas adaptações nas heurísticas e códigos já desenvolvidos.

Além das adaptações e adequações propostas para as heurísticas consideradas para o *Bin Packing* clássico, foi investigado também a proposta por Capua (2017), no qual a distribuição de itens é realizada respeitando possíveis dependências entre eles, de forma que todos os itens com dependência são distribuídos para o mesmo *bin*.

Os Algoritmos 4.6 e 4.7 descrevem a heurística adaptada a partir da proposta por Capua (2017). Neste caso é utilizado um grafo para representar os equipamentos e suas dependências, onde cada vértice representa um equipamento e as arestas representam as dependências entre eles.

Inicialmente, no Algoritmos 4.6 a seleção de equipamentos é realizada considerando uma hora específica e enquanto houver energia produzida para esta hora. Essa busca utiliza o algoritmo de DFS para auxiliar na escolha dos equipamentos que devem ser escalonados para a hora.

Algoritmo 4.6: Pricing (Φ, h)

Entrada: Φ : conjunto de equipamentos, h : hora considerada

```

1  $p \leftarrow$  capacidade de energia não escalonada em  $h$ 
2  $\phi \leftarrow$  conjunto de equipamentos ainda não escalonados
3 enquanto  $p > 0$ ) e  $|\phi| > 0$  faça
4    $e \leftarrow$  equipamento em  $\phi$ 
5    $\omega_e \leftarrow$  potência nominal do equipamento  $e$ 
6   se  $\omega_e \leq p$  então
7      $i \leftarrow$  nó equivalente a  $e$ 
8     DFS( $i, p$ )
9     se DFS encontrou um nó folha, um ciclo ou equipamento já
       escalonado então
10      Escalone para  $h$  os equipamentos da árvore de DFS
11      fim
12  fim
13 fim

```

Inicialmente, um equipamento e é escolhido para ser examinado. Essa escolha é realizada de forma gulosa, de acordo o número de dependências que o equipamento resolve se escalonado na hora especificada. Se há energia produzida suficiente para atender à demanda do equipamento, o mesmo é escalonado. Além disso, usa-se o algoritmo de DFS para tentar escalonar outros equipamentos juntos na hora e tentar resolver as restrições de dependência.

O algoritmo de DFS (Algoritmo 4.7) percorre o grafo examinando seus vértices, sendo que o vértice equivalente ao equipamento e (i) é considerado como o nó raiz. A busca pela árvore tem por objetivo encontrar um caminho na árvore que forme um ciclo que inclua o equipamento e ou outro equipamento já escalonado para a hora h , ou um nó folha, que não possua nós dependentes, como vistos na Figura 4.14. Desta forma, se alguma destas estruturas for encontrada, o conjunto formado pelo equipamento e e a árvore de DFS irá formar um subconjunto de equipamentos viável para o PBPD adaptado.

Algoritmo 4.7: DFS (i, p)

Entrada: i : nó do grafo de dependências, p : capacidade de energia restante para a hora analisada.

```

1 Marque  $i$  como visitado
2  $\omega_e \leftarrow$  potência nominal do equipamento  $e$ 
3 se  $\omega_e \leq p$  então
4   se não há nós adjacentes a  $i$  então
5     encontrou um nó folha
6   senão
7     para cada nó  $v$  adjacente a  $i$  faça
8       se o equipamento equivalente a  $v$  já foi atribuído à hora então
9         encontrou equipamento já escalonado
10        break
11      senão
12        se  $v$  não foi visitado então
13          Insere aresta  $(i, v)$  na árvore de DFS
14           $\omega_i \leftarrow$  potência nominal do equipamento equivalente a  $i$ 
15          DFS( $v, p - \omega_i$ )
16        senão
17          encontrou um ciclo
18          break
19        fim
20      fim
21    fim
22  fim
23 fim

```

Utilizando as heurísticas modificadas e adaptadas, juntamente com a heurística proposta por Capua (2017) (nomeada *Branch and Price* (BP)) os resultados foram reavaliados considerando as dependências entre os equipamentos. Os resultados são apresentados a seguir.

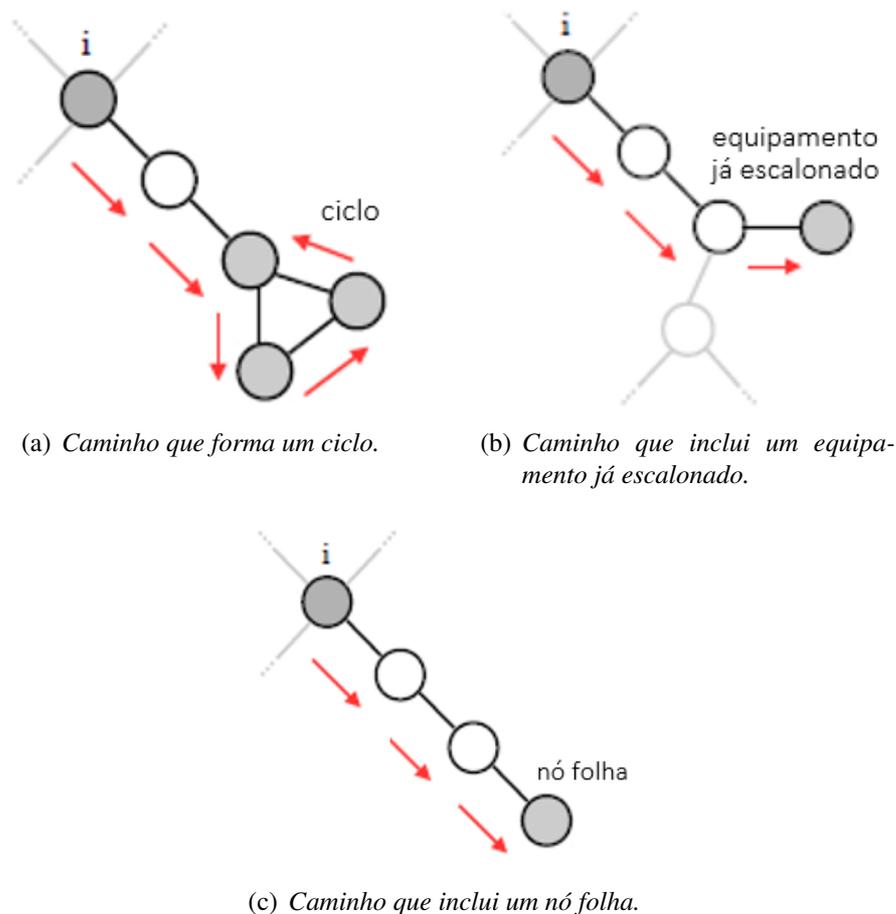


Figura 4.14: Tipos de caminhos na árvore que são buscados pelo DFS.

Fonte: Adaptado de (CAPUA, 2017).

4.5.1 Resultados para o dia 16 de setembro de 2020

Os resultados das heurísticas considerando as dependências são apresentados nas Figuras 4.15 a 4.20. Novamente foi apresentado o escalonamento empírico visando a comparação.

Para auxiliar na interpretação dos resultados agora com a inclusão das dependências, a Tabela 4.11 apresenta o consumo total da concessionária medido em cada heurística, assim como a energia produzida e não utilizada.

De acordo com estes resultados, com exceção da heurística FF, as demais conseguiram explorar bem o potencial de geração. Em complemento, as heurísticas WFD, SWFD e BP tiveram a vantagem adicional de concentrar o escalonamento em um período. Novamente esta condição é vantajosa devido a possibilidade de alocar de forma contínua as horas de pessoal permanente na propriedade, simplificando a contratação.

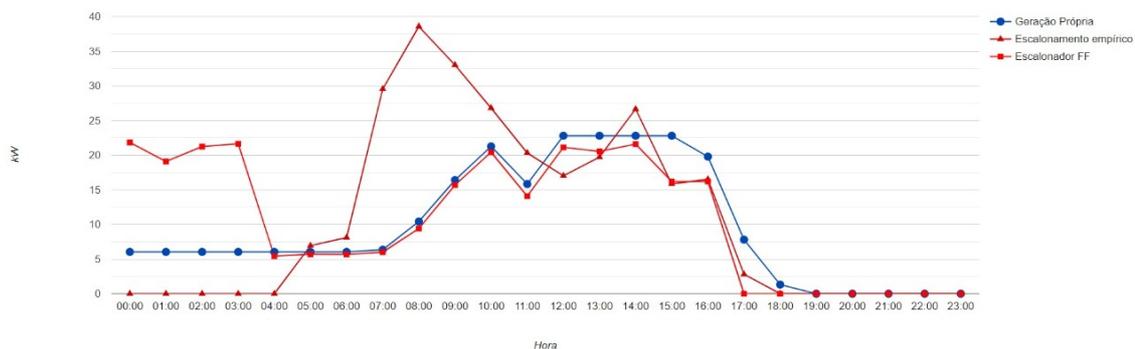


Figura 4.15: Escalonamento dado pela heurística FF com dependências para o dia 16 de setembro de 2020.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

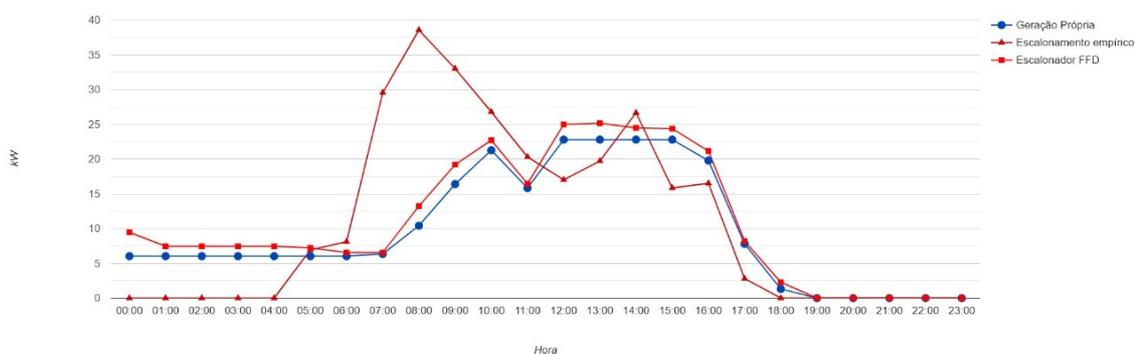


Figura 4.16: Escalonamento dado pela heurística FFD com dependências para o dia 16 de setembro de 2020.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

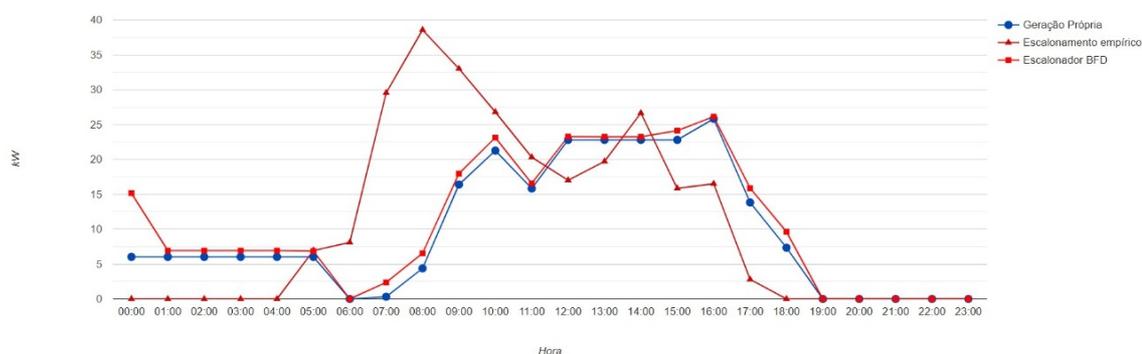


Figura 4.17: Escalonamento dado pela heurística BFD com dependências para o dia 16 de setembro de 2020.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

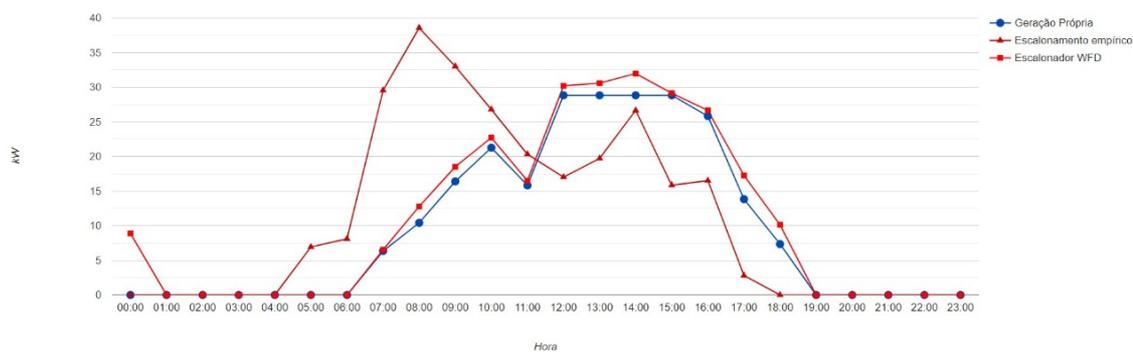


Figura 4.18: Escalonamento dado pela heurística WFD com dependências para o dia 16 de setembro de 2020.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

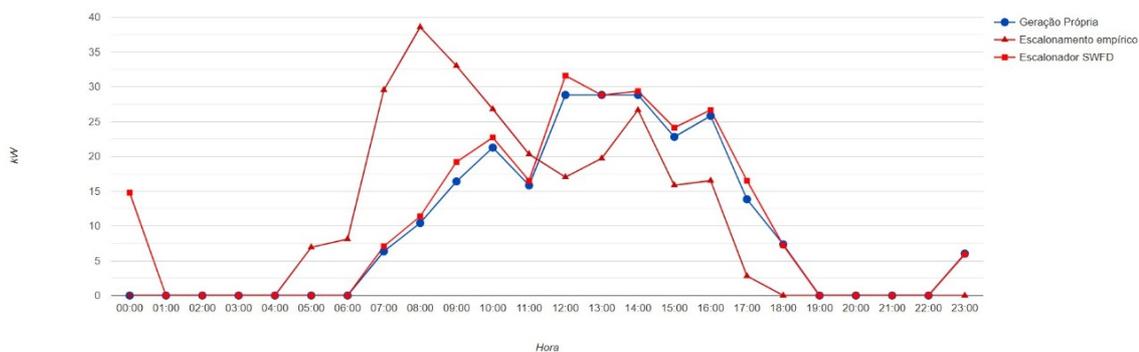


Figura 4.19: Escalonamento dado pela heurística SWFD com dependências para o dia 16 de setembro de 2020.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

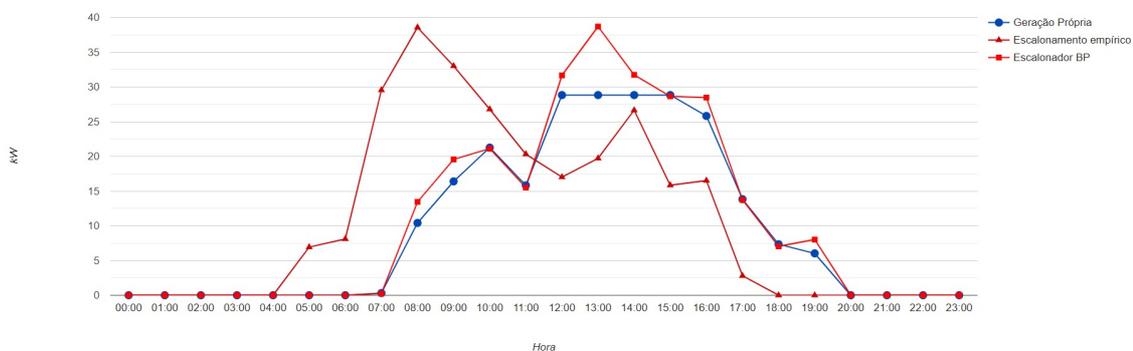


Figura 4.20: Escalonamento dado pela heurística BP com dependências para o dia 16 de setembro de 2020.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Tabela 4.11: Resultados obtidos nas aplicações das heurísticas com dependência para o dia 16 de setembro de 2020.

HEURÍSTICA	Energia total consumida da concessionária (kWh)	Energia produzida e não utilizada (kWh)
FF	78,0070	43,9590
FFD	34,0480	0,0000
BFD	34,0480	0,0000
WFD	34,0480	0,0000
SWFD	34,3815	0,3335
BP	27,9910	2,6606

Fonte: (Elaborado pelo autor).

4.5.2 Resultados considerando todos os demais cenários

Nas primeiras análises realizadas neste trabalho, foi considerado o escalonamento de apenas um único dia do estudo de caso. Após as considerações necessárias para a implementação dos casos de dependência e demais cenários no desenvolvimento deste trabalho, notou-se que os resultados, considerando a totalidade dos cenários é suficiente para realizar a análise, de forma que forma omitidos os resultados considerando um único dia.

A Tabela 4.12 apresenta a porcentagem de casos em que a heurística obteve o melhor resultado, excluindo os casos em que todas obtiveram o mesmo resultado.

Tabela 4.12: Resultados de aplicação das heurísticas considerando dependências para todos os dias de 2019, excluindo casos em que todas obtiveram mesmo resultado.

Heurística	Porcentagem de instâncias do problema
FF	53,98
FFD	55,24
BFD	58,78
WFD	56,37
SWFD	54,61
BP	59,77

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Observando novamente os resultados, foi possível identificar que mesmo excluindo os casos em que todas as heurísticas chegam ao mesmo resultado, ainda há situações de equivalências entre elas, ou seja, casos em que duas ou mais heurísticas chegam ao mesmo resultado. Em virtude disso, foram analisados os casos em que uma única heurística obtém o melhor escalonamento. Os resultados são apresentados na Tabela 4.13

Tabela 4.13: *Resultados de aplicação das heurísticas com dependências para todos os dias de 2019, considerando apenas os casos em que há uma única heurística que obtém o melhor resultado.*

Heurística	Porcentagem de instâncias do problema
FF	0,01
FFD	0,46
BFD	7,25
WFD	2,42
SWFD	0,20
BP	36,28

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Também foi analisado a diferença de consumo da concessionária entre a melhor e a pior heurística em cada instância. A Figura 4.21 apresenta a diferença considerando todas as instâncias. Para tal foi necessário estabelecer um método que permitisse a apresentação de todos os valores a partir dos 427 resultados percentuais obtidos das 146.000 instâncias. O processo se deu da seguinte forma:

1. foram selecionados o maior e o menor valor da série dos 427 resultados;
2. foi calculado o valor médio dos dados da série;
3. definiu-se que seriam utilizadas 20 classes para a obtenção da distribuição de probabilidades devido a quantidade de dados existentes na série;
4. foi estabelecido um valor de incremento que determinava a largura de cada classe para a disposição dos dados. Para isto foi usado a diferença entre o mínimo valor e o máximo valor dos dados da série e dividido pelo número de classes determinadas (20);
5. foi calculado o desvio padrão dos valores dos dados da série; e
6. foi determinado um segundo valor de incremento para calcular a curva de distribuição normal.

A partir da junção destes dados foi possível criar a série de distribuição normal apresentada, calculando o valor da função de densidade de massa nos diversos pontos

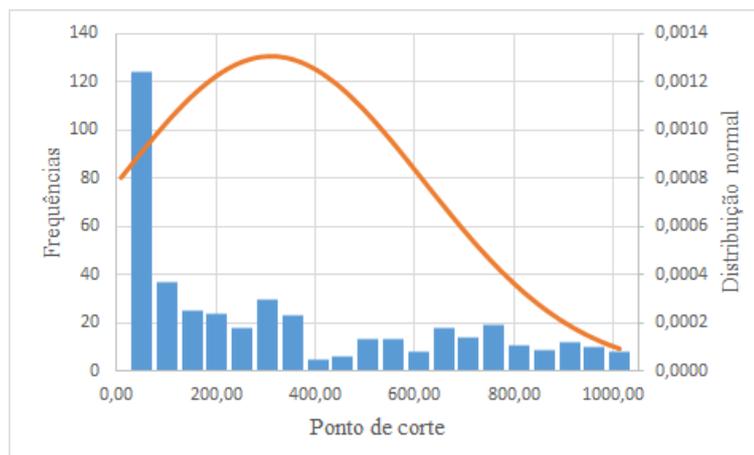


Figura 4.21: *Diferença de consumo de energia da concessionária quando as heurísticas chegam a resultados distintos, considerando todos os dias de 2019.*

Fonte: (Elaborado pelo autor).

de dispersão. Para tal, foram novamente estabelecidos 100 pontos de corte utilizando o segundo valor de incrementos estabelecido anteriormente. Devido à quantidade de valores muito pequenos, foi necessário ajustar novamente os dados em um eixo secundário para que fosse possível a visualização.

Este resultado reforça a importância de se escolher de forma adequada a heurística a ser utilizada visto que é possível visualizar uma diferença de até 10,11 kWh.

Tabela 4.14: *Capacidade de energia produzida e não utilizada, considerando todos os dias de 2019 com dependências.*

Heurística	Porcentagem de instâncias para as quais há energia produzida que não foi utilizada	Energia não utilizada (kWh) com intervalo de confiança de 95%
FF	48,99	7,32 ± 0,04
FFD	21,10	2,49 ± 0,03
BFD	7,92	0,30 ± 0,05
WFD	1,65	3,57 ± 0,28
SWFD	99,99	3,02 ± 0,02
BP	0,06	0,12 ± 0,01

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Analisando ainda os casos em que não foi utilizada toda energia produzida, embora tenha havido ao menos alguma outra que explorou toda a capacidade, obtém-

se os resultados apresentados na Tabela 4.14. É apresentado a porcentagem de instâncias no qual isso ocorre, considerando o conjunto de instâncias para as quais ao menos uma heurística utilizou todo o potencial. Também é apresentada média da energia não utilizada nestes casos, considerando um intervalo de confiança de 95%.

Diante desses resultados, é possível afirmar que ao considerar dependências entre os equipamentos, a heurística BP obteve os melhores resultados, tanto do ponto de vista de uso de energia da concessionária quanto da exploração de energia de produção própria. Isso era esperado uma vez que esta é a única voltada especificamente para a variante do PBP considerando dependências.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A matriz elétrica brasileira é composta em sua maioria por fontes limpas e renováveis. Na última década houve uma maior penetração das fontes de geração distribuída e para os próximos anos está previsto para entrar em operação um aumento considerável da capacidade instalada, destacando-se as geração solar e eólica.

O governo nacional criou iniciativas com programas que incentivaram o uso consciente, racional e organizado da energia elétrica disponível na matriz elétrica. Políticas de incentivo com redução de taxas e tarifas foram adotadas para fomentar a geração elétrica e aumento da eficiência. Mesmo com a pandemia do COVID-19, novos produtos entraram no mercado para aumentar a geração elétrica. Estruturas inteligentes e equipamentos mais eficientes estão auxiliando no que diz respeito ao consumo mas ainda é preciso avançar neste contexto.

Através de pesquisas em plataformas de dados foi possível encontrar diversos estudos que apontam o aprimoramento dos fatores de eficiência na produção e consumo de energia elétrica produzida em modelos de GD. Cada fonte geradora possui sazonalidades e particularidades, onde trabalhando juntas de forma híbrida podem gerar um alto fator de segurança energética e alterar a curva de produção de energia elétrica. A possibilidade de trabalhar de forma híbrida permitiu que diferentes fontes geradoras mudassem o cenário da produção elétrica.

Neste contexto, a utilização de ferramentas computacionais trouxe novas perspectivas no tocante à modelagem, controle e segurança de estruturas elétricas com penetração de GD. Estas ferramentas auxiliam na projeção e preparação de sistemas, otimizando a geração e consumo elétrico. A utilização da modelagem computacional proporciona uma plataforma para análise de diferentes cenários e condições para testes que seriam complexos de reproduzir em cenários reais.

Diante das condições supracitadas, este trabalho trouxe uma proposta que melhora o uso eficiente da energia elétrica disponível produzida em modelos de GD, valorizando o auto consumo, com o auxílio de modelagem computacional. A proposta foi arranjar da melhor forma o consumo elétrico de um conjunto de equipamentos para que os mesmos fossem utilizados nos momentos de maior disponibilidade energética das fontes disponíveis.

Para a obtenção dos parâmetros de geração e consumo foi utilizado uma propriedade como estudo de caso, considerando que a mesma modelagem utilizada possa ser aplicada a qualquer outro caso que tenha características semelhantes. Na modelagem do

estudo de caso foi preciso estabelecer o total da energia elétrica gerada em modelos híbridos utilizando sistema fotovoltaico e geração por biomassa. Como matéria prima de biomassa foram considerado os dejetos dos animais presentes na propriedade. Para os mesmo foram utilizados referências bibliográficos para sua mensuração.

Após considerar todos os equipamentos utilizados na estrutura funcional da propriedade, observando o potência nominal indicado nos manuais de cada equipamentos, os períodos de funcionamento e o tempo que os mesmos permaneceram ligados, foi possível determinar o consumo total da estrutura elétrica da propriedade. Em seguida foi proposta uma estratégia baseada no *Problema do Bin Packing*, cuja avaliação foi realizada através de diferentes simulações utilizando um *dataset* considerando as heurísticas estabelecidas. Na solução proposta foi analisado o escalonamento de equipamentos de maneira individual e considerando dependências entre eles.

O objetivo principal da avaliação foi comparar os resultados obtidos, buscando destacar as contribuições resultantes desta aplicação e identificar a melhor heurística para solução do problema. Nos resultados obtidos observou-se que determinadas heurísticas podem valorizar condições que em determinados aspectos podem ser mais favoráveis do que outras. Como principal conclusão, as heurísticas *First Fit* e *Worst Fit Decreasing* apresentaram os melhores resultados ao realizar o escalonamento dos equipamentos de maneira individual. Para a análise considerando as dependências de funcionalidades entre os equipamentos a heurística *Branch and Price* obtém os melhores resultados.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito de dar continuidade à pesquisa iniciada neste trabalho, para aprofundar o conhecimento da área, sugere-se os seguintes estudos complementares:

- análise de viabilidade econômica para a implementação dos arranjos estabelecidos pelas heurísticas em estruturas funcionais;
- implementar as heurísticas de otimização utilizadas neste trabalho em outros casos para comparação dos resultados;
- quantificar a receita de energia excedente cedida para a rede da concessionária e avaliar custos para melhoramento do parque elétrico;
- avaliar a viabilidade para a implementação de projetos para eficiência energética em propriedades que não obtiverem coeficiente superior à sua demanda após arranjo estrutural;

- adequação da estratégia proposta para que seja realizado o escalonamento dinâmico usando dados em tempo real providos por medidores inteligentes e possíveis tarifas variáveis;
- analisar o comportamento das heurísticas aplicadas neste trabalho em outros estudos de casos utilizando como métrica para a quantificação da produção fotovoltaica base de dados históricos de irradiância;
- uso de meta-heurísticas para saída de mínimos locais proporcionados pelas heurísticas. Além disso, investigar a adoção de soluções não-determinísticas.

5.2 Publicações

Durante o período de pesquisa foi possível produzir 03 (três) publicações. Estas publicações contribuíram diretamente e de forma ampla para a justificativa e referencial bibliográfico do trabalho. Outro aspecto importante foi a possibilidade de publicar os resultados preliminares da pesquisa. A seguir são apresentadas estas publicações.

- RIBEIRO, F. D.; PINHO, A. G.; GOMES, R. A.; DOMINGUES, E. G.. *A Systematic Literature Review of Electricity Distribution in Smart Grid Scenarios*. **Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)**, v. 18, p. 122-127, 2020.

Este artigo teve como objetivo destacar os principais trabalhos relevantes que fazem referência às tecnologias desenvolvidas para solucionar de forma inteligente problemas relacionados à distribuição de energia elétrica. Através de pesquisa nas principais bases de dados de publicações científicas desta temática, foram selecionados os trabalhos com maior relevância. A partir deste resultado foi possível identificar a lacuna existente quanto a resultados de escalonamento de consumo no cenário proposto.

- RIBEIRO, Frederico; DE ALMEIDA, Fernando Souza; DE AQUINO GOMES, Raphael. *Uma proposta de modelagem de consumo e potencial de energia em cenários com geração distribuída*. In: **XXIII Encontro Nacional de Modelagem Computacional e XI Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais**. Palmas - TO, 2020.

Este artigo apresenta uma proposta de modelagem de consumo de energia e de energia em potencial utilizando geração fotovoltaica e a partir de biomassa. É apresentado um estudo de caso que ilustra a modelagem proposta, assim como uma discussão dos resultados. O artigo descreve os primeiros resultados apresentados aqui, relativos à modelagem proposta.

- RIBEIRO, Frederico; DE ALMEIDA, Fernando Souza; DE AQUINO GOMES, Raphael. *A preliminary study on energy consumption scheduling in scenarios with distributed generation*. **Revista Cereus**, v. 12, n. 4, p. 160-177, 2020.

Este artigo apresenta os resultados iniciais da estratégia aqui descrita. Inicialmente é descrita uma proposta de modelagem do consumo de energia e do potencial de geração de energia a partir de fontes fotovoltaicas e de biomassa. Em seguida, através de um estudo de caso, os resultados preliminares da proposta são discutidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIEC. **BeefREPORT: Perfil da Pecuária no Brasil 2020**. [s.n.], 2020. Disponível em: <http://abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2020>. Acesso em: 27 jun. 2020. [37] [38]

AFSAR, H Murat et al. **Machine reassignment problem: the ROADEF/EURO challenge 2012**. [S.l.]: Springer, 2016. [50]

ALAHAKOON, Damminda; YU, Xinghuo. Smart electricity meter data intelligence for future energy systems: A survey. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, IEEE, v. 12, n. 1, p. 425–436, 2015. [46]

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil, 3 ed., Brasília, DF**. [S.l.], 2008. [27] [32] [34] [38] [40]

_____. **Projeto Estratégico de P&D “Programa Brasileiro de REDES INTELIGENTES – Chamada ANEEL nº 011/2010. Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética – SPE. 2010. Brasília, DF**. [S.l.], 2010. [22]

_____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. [s.n.], 2016. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/prodist>. Acesso em: 21 fev. 2020. [62]

_____. **Boletim de Informações Gerenciais - 1º trimestre de 2019. Brasília, DF**. [S.l.: s.n.], 2019. [28] [30]

ARAUJO, Saulo Jardim. **Análise de potencial e viabilidade de micro e mineração distribuída de energia solar fotovoltaica: Um estudo de caso para uma cidade de médio porte. 2016.140 f.** Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2016., 2016. [22] [23] [33] [34]

ASAE. **Manure production and characteristics, american society of agricultural engineers**. 2003. [53]

BALDI, Mauro Maria et al. A generalized bin packing problem for parcel delivery in last-mile logistics. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 274, n. 3, p. 990–999, 2019. [48]

BARNHART, Cynthia et al. Branch-and-price: Column generation for solving huge integer programs. **Operations research, INFORMS**, v. 46, n. 3, p. 316–329, 1998. [51](#)

BARRETO, EJP; PINHO, JT. Sistemas híbridos, soluções energéticas para a Amazônia. **Brasília: MME**, 2008. [33](#)

BEM, Armando José Dal. **Análise de desempenho de um motor ciclo Otto alimentado com álcool de 75 INPM**. Tese (Doutorado) — Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo. 231p, 2008. Disponível em:

https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18149/tde-17012011-142254/publico/TeseCompleta_Pos_Banca.pdf. Acesso em: 07 jul. 2020. [58](#)

BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da termodinâmica**. [S.l.]: Editora Blucher, 2018. [38](#)

BORRADAILE, Glencora; HEERINGA, Brent; WILFONG, Gordon. The knapsack problem with neighbour constraints. **Journal of Discrete Algorithms**, Elsevier, v. 16, p. 224–235, 2012. [50](#)

BOYAR, Joan; FAVRHOLDT, Lene M. The relative worst order ratio for online algorithms. **ACM Transactions on Algorithms (TALG)**, ACM New York, NY, USA, v. 3, n. 2, p. 22–es, 2007. [50](#)

BRASIL. **Lei nº 10.295 de 17 de outubro de 2001**. Brasília, DF. 2001. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110295.htm. Acesso em: 27 out. 2019. [32](#)

_____. **Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília, DF. 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 27 out. 2019. [30](#), [31](#)

_____. **Nota Técnica DEA 07/13: Avaliação da Eficiência Energética e Geração Distribuída para os próximos 10 anos (2013-2022)**. Rio de Janeiro, RJ. [S.l.], 2013. [29](#)

_____. **Resolução normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Brasília, DF. 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 27 out. 2019. [31](#)

_____. **Resolução normativa nº 792, de 28 de novembro de 2017**. Brasília, DF. 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017482.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2020. [23](#), [31](#)

_____. **Revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída – Resolução Normativa nº 482/2012: Relatório de Análise de Impacto Regulatório nº 0004/2018-SRD/SCG/SMA/ANEEL. Brasília, DF. [S.l.], 2018. [31]**

_____. **Nota Técnica nº 022 de 29 de julho de 2019. Resposta a Demanda: Conceitos, Aspectos Regulatórios e Planejamento Energético. Brasília, DF. 2019. Disponível em: https://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-389/NT_EPE_DEE-NT-022_2019-r0.pdf. Acesso em: 03 jun. 2020. [23] [32] [44] [45]**

CAPUA, Renatha Oliva. **Métodos de Resolução para o Problema de Bin Packing com Conflitos e para o Problema de Bin Packing com Dependências**. Tese (Doutorado em Computação) — Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017. [25] [50] [51] [70] [90] [92] [93]

CARON, Stéphane; KESIDIS, George. Incentive-based energy consumption scheduling algorithms for the smart grid. *In: IEEE. 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*. [S.l.], 2010. p. 391–396. [63]

CARVALHO, Rafael Lima de; ALMEIDA, Tiago da Silva; ROCHA, Marcelo Lisboa. Introdução às metaheurísticas. **Portal de Livros da Editora**, v. 1, n. 18, p. Lv18–Lv18, 2020. [47]

CASTRO, Rui MG. Energias renováveis e produção descentralizada. **DEEC, Área Científica de**, 2007. [38] [39]

CHANDLER, Shawn A; HUGHES, Joshua G. Smart grid distribution prediction and control using computational intelligence. *In: IEEE. 2013 1st IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*. [S.l.], 2013. p. 86–89. [46]

CHOWDHURY, Mohammed Rashid; MAHMUD, Mohammad Raihan; RAHMAN, Rashedur M. Implementation and performance analysis of various vm placement strategies in clouds. **Journal of Cloud Computing**, SpringerOpen, v. 4, n. 1, p. 1–21, 2015. [48]

CIBIOGÁS. **Manual de Equações e Metodologias do Simulador. Plataforma de Informações para Energias Renováveis. Foz do Iguaçu**. [S.l.], 2009. [52] [56]

_____. **Fundamentos do biogás: Conceitos básicos de digestão anaeróbia. Foz do Iguaçu**. [S.l.], 2020. [35] [36]

COELHO, Suani Teixeira et al. Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano. **Part. I**, 2018. [24] [37]

CORMEN, Thomas H et al. **Introduction to algorithms**. [S.l.]: MIT press, 2009. [49](#), [51](#)

CORRÊA, Alessandro Simões et al. A influência da folga da válvulas na geração de ruído e vibração no motor fire 999cc 8v. Florianópolis, SC, 2003. [38](#)

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa. **Biomassa para energia**. [S.l.]: Unicamp, 2008. [30](#), [38](#)

COSTA, Mateus J. R. Paranhos; BATTAGLIA, Daniela. **Boas práticas de manejo: vacinação bovinos leiteiros. 1. ed. 2. imp. Jaboticabal**. FUNEP/UNESP, 2014.

Disponível em: http://www.grupoetco.org.br/arquivos_br/manuais/manual-boas-praticas-de-manejo_vacinacao-bovinos-leiteiros.pdf. Acesso em: 04 jul. 2020. [54](#)

CRESESB. **Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio de S. Brito**. [s.n.], 2018. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 09 ago. 2018. [41](#)

CSIRIK, János. Two simple algorithms for bin covering. *Acta Cybernetica*, v. 14, n. 1, p. 13–25, 1999. [50](#)

CUNHA, Claudio Barbieri da et al. Heurísticas para o problema de bin-packing no contexto da distribuição física de produtos. 2008. [48](#)

DONG, H; MANGINO, J; MCALLISTER, TA. **Emissions from livestock and manure management. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva, Switzerland: IPCC; 2006**. 2006. [52](#), [55](#), [56](#)

ELETROBRAS. Programa nacional de conservação e energia elétrica. **Relatório da pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso: classe-residencial: ano base, 2005**. [32](#)

ELTANTAWY, Ayman B; SALAMA, Magdy MA. A novel zooming algorithm for distribution load flow analysis for smart grid. *IEEE transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 5, n. 4, p. 1704–1711, 2014. [46](#)

EMBRAPA. **Sistema de alimentação**. [S.l.]: Embrapa Gado de Leite. Juiz de Fora, MG., 2001. [38](#), [54](#)

_____. **Emissões de metano da pecuária. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia**. [s.n.], 2006. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/129582/1/2006OL-009.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2020. [52](#)

_____. **Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil**. [s.n.], 2018. Disponível em: <https://ainfo>.

cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181512/1/SDoc1961.pdf. Acesso em: 11 fev. 2020. [24] [37] [52] [53] [54] [55] [57]

EPE. **Plano Nacional de Energia 2030. Brasília, DF.** [S.l.], 2008. [28] [32]

_____. **Recursos Energéticos Distribuídos: Impactos no Planejamento Energético. Rio de Janeiro, RJ.** 2018. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/ND%20-%20Recursos%20Energ%C3%A9ticos%20Distribu%C3%ADdos.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2020. [45]

_____. **Balço energético nacional 2021.** 2021. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2021. [27]

FALKENAUER, Emanuel. A hybrid grouping genetic algorithm for bin packing. **Journal of heuristics**, Springer, v. 2, n. 1, p. 5–30, 1996. [83]

FARIA, AF. **Eficiência Energética e Geração Distribuída: Estudo de Caso Aplicado a Sistema de Iluminação, Condicionamento Ambiental e Adição de Fonte Incentivada de Energia Elétrica.** 2016. 140 f. Dissertação (Mestrado) — Dissertação (Mestrado)—Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis . . . , 2016. [22]

FATIMA, Aisha et al. Virtual machine placement via bin packing in cloud data centers. **Electronics**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 12, p. 389, 2018. [48]

FILHO, Souza Aroldo José Teixeira de et al. Análise da viabilidade de sistema híbrido biogás-solar na geração de energia e seus impactos nas emissões de gases. Instituto Federal Goiano, 2019. [33]

GARCIA, Osvaldo. Integracao de tecnicas de gerencia de redes ao gerenciamento de cargas em redes de distribuicao eletrica. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação**, v. 1, n. 1, 2002. Disponível em: www.http://www.periodicosibepes.org.br/index.php/reinfo/article/view/119/21.

Acesso em: 11 jun. 2020. [23]

GARCILASSO, Vanessa Pecora; VELÁZQUEZ, SMSG; COELHO, Suani Teixeira. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente de aterro sanitário—estudo de caso. *In: XIII CBE-Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro.* [S.l.: s.n.], 2010. [38]

GELLINGS, Clark W. The concept of demand-side management for electric utilities. **Proceedings of the IEEE**, Ieee, v. 73, n. 10, p. 1468–1470, 1985. [23](#)

_____. **The smart grid: enabling energy efficiency and demand response**. [S.l.]: CRC press, 2020. [45](#)

GOOGLE. **Google Earth Website**. [s.n.], 2020. Disponível em:

<https://earth.google.com/web/@-14.71031567,-49.18829615,524.10765782a,1555.47613531d,35y,0h,0t,0r>

Acesso em: 03 jun. 2020. [68](#)

HAOUARI, Mohamed; SERAIRI, Mehdi. Heuristics for the variable sized bin-packing problem. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 36, n. 10, p. 2877–2884, 2009. [47](#)

HASHMI, MHSMK; HÄNNINEN, Seppo; MÄKI, Kari. Survey of smart grid concepts, architectures, and technological demonstrations worldwide. *In: IEEE. 2011 IEEE PES conference on innovative smart grid technologies Latin America (ISGT LA)*. [S.l.], 2011. p. 1–7. [46](#)

IBGE. **Censo, 2019**. [s.n.], 2019. Disponível em:

<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/uruacu/panorama>

Acesso em: 16 jul. 2020. [37](#) [67](#)

_____. **Domicílios Brasileiros**. [s.n.], 2019. Disponível em:

<https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/21130-domicilios-brasileiros.html#:~:text=Em%202019%2C%20quase%20que%20a,se%20dava%20em%20tempo%20integral.>

Acesso em: 19 jul. 2020. [28](#)

INMET. **Dados históricos anuais**. Instituto Nacional de Meteorologia, 2019. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos.>

Acesso em: 03 set. 2020. [78](#)

INMETRO. **Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Brasília, DF**. 2001.

Disponível em:

<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/conheca-o-programa.>

Acesso em: 18 jul. 2021. [32](#)

INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2 ed., São Paulo**. [S.l.], 2017. [41](#) [42](#)

JOHNSON, David S. Fast algorithms for bin packing. **Journal of Computer and System Sciences**, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 272–314, 1974. [47](#)

KAGAN, Nelson et al. Redes elétricas inteligentes no brasil: análise de custos e benefícios de um plano nacional de implantação. **Rio de Janeiro: Synergia Editora**, v. 260, 2013. [22](#)

KARLSSON, Tommy et al. Manual básico de biogás. **Lajeado: Editora da Univates**, 2014. Disponível em: https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf. Acesso em: 20 jun. 2020. [35](#)

KARP, Richard M. Reducibility among combinatorial problems. *In: Complexity of computer computations*. [S.l.]: Springer, 1972. p. 85–103. [48](#)

KONSTANTELOS, Ioannis; GIANNELLOS, Spyros; STRBAC, Goran. Strategic valuation of smart grid technology options in distribution networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 32, n. 2, p. 1293–1303, 2016. [24](#)

LAI, Ten-Hwang; SAHNI, Sartaj. Anomalies in parallel branch-and-bound algorithms. **Communications of the ACM**, ACM New York, NY, USA, v. 27, n. 6, p. 594–602, 1984. [51](#)

LAWLER, Eugene L; WOOD, David E. Branch-and-bound methods: A survey. **Operations research**, INFORMS, v. 14, n. 4, p. 699–719, 1966. [50](#)

LÉVESQUE, Martin et al. Communications and power distribution network co-simulation for multidisciplinary smart grid experimentations. *In: Proceedings of the 45th Annual Simulation Symposium*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–7. [46](#)

LIU, Xiaohui et al. Purchasing vs. leasing: A benefit-cost analysis of residential solar pv panel use in california. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 66, p. 770–774, 2014. [44](#)

MARTELLO, Silvano; PISINGER, David; VIGO, Daniele. The three-dimensional bin packing problem. **Operations research**, INFORMS, v. 48, n. 2, p. 256–267, 2000. [50](#)

MARTINS, Fernando Ramos et al. Atlas brasileiro de energia solar. INPE, 2017. [60](#)

MIURA, Marcos. **Modelagem heurística no problema de distribuição de cargas fracionadas de cimento**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008. [48](#)

MME. **Plano Nacional de Eficiência Energética. Brasília, DF**. 2011. Disponível em: http://cmsdespoluir.cnt.org.br/Documents/PDFs/Plano_Nacional_de_Eficiência_Energética_-_PNEf_-_final.pdf. Acesso em: 20 out. 2019. [32](#)

_____. **Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis. 96. ed. Brasília, DF**. 2016. Disponível em:

<http://www.mme.gov.br/documents/1138769/1732805/Boletim+DCR+n%C2%BA+96+-+fevereiro+de+2016.pdf/9db5f193-af66-4124-80c1-0abc74ed63f7>.

Acesso em: 06 set. 2019. [35]

_____. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**

Março/2021. Brasília, DF. 2021. Disponível em:

<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2021/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-abr-2021.pdf/view>. Acesso

em: 01 jun. 2021. [29, 41, 44]

MOHAGHEGHI, Salman et al. Demand response architecture: Integration into the distribution management system. *In: IEEE. 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*. [S.l.], 2010. p. 501–506. [25]

MOREIRA, S. R. J. Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética. **Rio de Janeiro: LTC**, 2017. [23, 24]

MUELLER, Charles C. Os economistas e as inter-relações entre o sistema econômico e o meio ambiente. **Versão preliminar, NEPAMA, Departamento de Economia, UnB**, 2004. [28]

MURITIBA, Albert E Fernandes et al. Algorithms for the bin packing problem with conflicts. **Inform Journal on computing, INFORMS**, v. 22, n. 3, p. 401–415, 2010. [83]

NAN, Sibou; ZHOU, Ming; LI, Gengyin. Optimal residential community demand response scheduling in smart grid. **Applied Energy**, Elsevier, v. 210, p. 1280–1289, 2018. [25]

NASIRI, Baktash et al. Distribution grid planning considering smart grid technologies. **CIREN-Open Access Proceedings Journal, IET**, v. 2017, n. 1, p. 2228–2232, 2017. [46]

NISKIER, Júlio; MACINTYRE, Archibald Joseph. Instalações elétricas. 6ª edição. **Ed. LTC, Rio de Janeiro**, 2013. [59]

NIZ, Dionisio De; RAJKUMAR, Raj. Partitioning bin-packing algorithms for distributed real-time systems. **International Journal of Embedded Systems**, Inderscience Publishers, v. 2, n. 3-4, p. 196–208, 2006. [48]

NWULU, Nnamdi I; XIA, Xiaohua. Optimal dispatch for a microgrid incorporating renewables and demand response. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 101, p. 16–28, 2017. [25]

OJEYINKA, Taiwo O. Bin packing algorithms with applications to passenger bus loading and multiprocessor scheduling problems. **Communications on Applied Electronics**, v. 2, n. 8, p. 38–44, 2015. [50](#)

ONS. **Matriz de energia elétrica do SIN**. [s.n.], 2021. Disponível em:

<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 03 jun. 2021. [28](#)

PEDROSO, Luiz Lúcio de Aragão et al. Demandas atuais e futuras da biomassa e da energia renovável no Brasil e no mundo. **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 5, p. 1980–1996, 2018. [27](#)

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **Rio de Janeiro**, v. 1, 2014. [43](#), [59](#), [61](#), [62](#)

REIS, Lineu Belico dos. **Geração de Energia Elétrica**. [S.l.]: MANOLE, 2011. [22](#), [23](#), [24](#), [30](#), [33](#), [41](#)

RESENDE, JA et al. Dejetos bovinos para produção de biogás e biofertilizante por biodigestão anaeróbica. **Embrapa Gado de Leite-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, Juiz de Fora, MG: Embrapa Gado de leite, 2015., 2015. [35](#)

ROHSTOFFE, Fachagentur Nachwachsende. Guia prático do biogás: Geração e utilização. **Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (BMELV)**, v. 234, 2010. Disponível em:

<http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/1/e/leitfadenbiogas-por-finalweb20131002.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2018. [24](#), [35](#), [36](#), [38](#)

ROSIN, Rafael; GUAZZELLI, Cauê Sauter; CUNHA, CB. Heurísticas pra o problema de bin packing com bins de diferentes tamanhos no contexto logístico. **Pesquisa Operacional na Gestão do conhecimento–SBPO**, p. 1155–1167, 2009. [25](#)

RUZBAHANI, Hossein Mohammadi; RAHIMNEJAD, Abolfazl; KARIMIPOUR, Hadis. Smart households demand response management with micro grid. *In: IEEE. 2019 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. [S.l.], 2019. p. 1–5. [63](#)

SILVA, Cristine Brandt da et al. **Abordagem teórica do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. [37](#)

SOLAREEDGE. **O Futuro dos Inversores como Gestores Smart Energy**. [s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.solaredge.com/br/products/pv-inverters>. Acesso em: 03 jun. 2020. 43

SOUZA, Samuel Nelson Melegari de; ASSOCIADO, C. Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural. 2016. 39, 40

TANG, Shaojie et al. Smoothing the energy consumption: Peak demand reduction in smart grid. *In: IEEE. 2013 Proceedings IEEE INFOCOM*. [S.l.], 2013. p. 1133–1141. 63

TARJAN, Robert. Depth-first search and linear graph algorithms. **SIAM journal on computing**, SIAM, v. 1, n. 2, p. 146–160, 1972. 51

TOLEDO, Fabio. **Desvendando as Redes Elétricas Inteligentes-Smart Grid Handbook**. [S.l.]: Brasport, 2012. 23

TRIENEKENS, Harry WJM. Parallel branch and bound on an mimd system. 1986. 51

UDE, Nnachi Gideon; YSKANDAR, Hamam; GRAHAM, Richards Coneth. A comprehensive state-of-the-art survey on the transmission network expansion planning optimization algorithms. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 123158–123181, 2019. 46

VIANA, Susana. Modelação de micro-sistemas híbridos fotovoltaicos/eólicos para produção descentralizada. **Modelação de Micro-Sistemas Híbridos Fotovoltaicos/Eólicos para Produção Descentralizada**, 2010. 33

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. **São Paulo: Érica**, v. 2, 2012. 23 24 27 33 42 61 79

WAKEFIELD, Matthew P. Smart distribution system research in eprl's smart grid demonstration initiative. *In: IEEE. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [S.l.], 2011. p. 1–4. 47

XU, Dechao et al. Design and development of a simulation system for smart distribution grid. *In: IEEE. 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. [S.l.], 2016. p. 1–4. 24, 46

YANG, Jian; LEUNG, Joseph Y-T. The ordered open-end bin-packing problem. **Operations Research**, INFORMS, v. 51, n. 5, p. 759–770, 2003. 50

YAO, Andrew Chi-Chih. New algorithms for bin packing. **Journal of the ACM (JACM)**, ACM New York, NY, USA, v. 27, n. 2, p. 207–227, 1980. 47

ZHU, Ziming et al. An integer linear programming based optimization for home demand-side management in smart grid. *In: IEEE. 2012 IEEE PES innovative smart grid technologies (ISGT)*. [S.l.], 2012. p. 1–5. [25](#)

ZILLES, Roberto et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. [S.l.]: Oficina de textos, 2016. [24](#)